

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR-INGENIEUR

par

Christian HUSSENOT-DESENONGES

Ingénieur I. S. E. P.

SUJET

Mesure des fluctuations géométriques de surface libre

Soutenue le 20 Janvier 1972, devant la Commission d'Examen

M. J. KRAVTCHENKO

Président

M. L. SANTON

M. A. CRAYA

M. J. DODU, Rapporteur

M. A. COUMES

Examineurs

GRENOBLE

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR-INGENIEUR

par

Christian HUSSENOT-DESENONGES

Ingénieur I. S. E. P.

SUJET

Mesure des fluctuations géométriques de surface libre

Soutenue le 20 Janvier 1972, devant la Commission d'Examen

M. J. KRAVTCHENKO

Président

M. L. SANTON

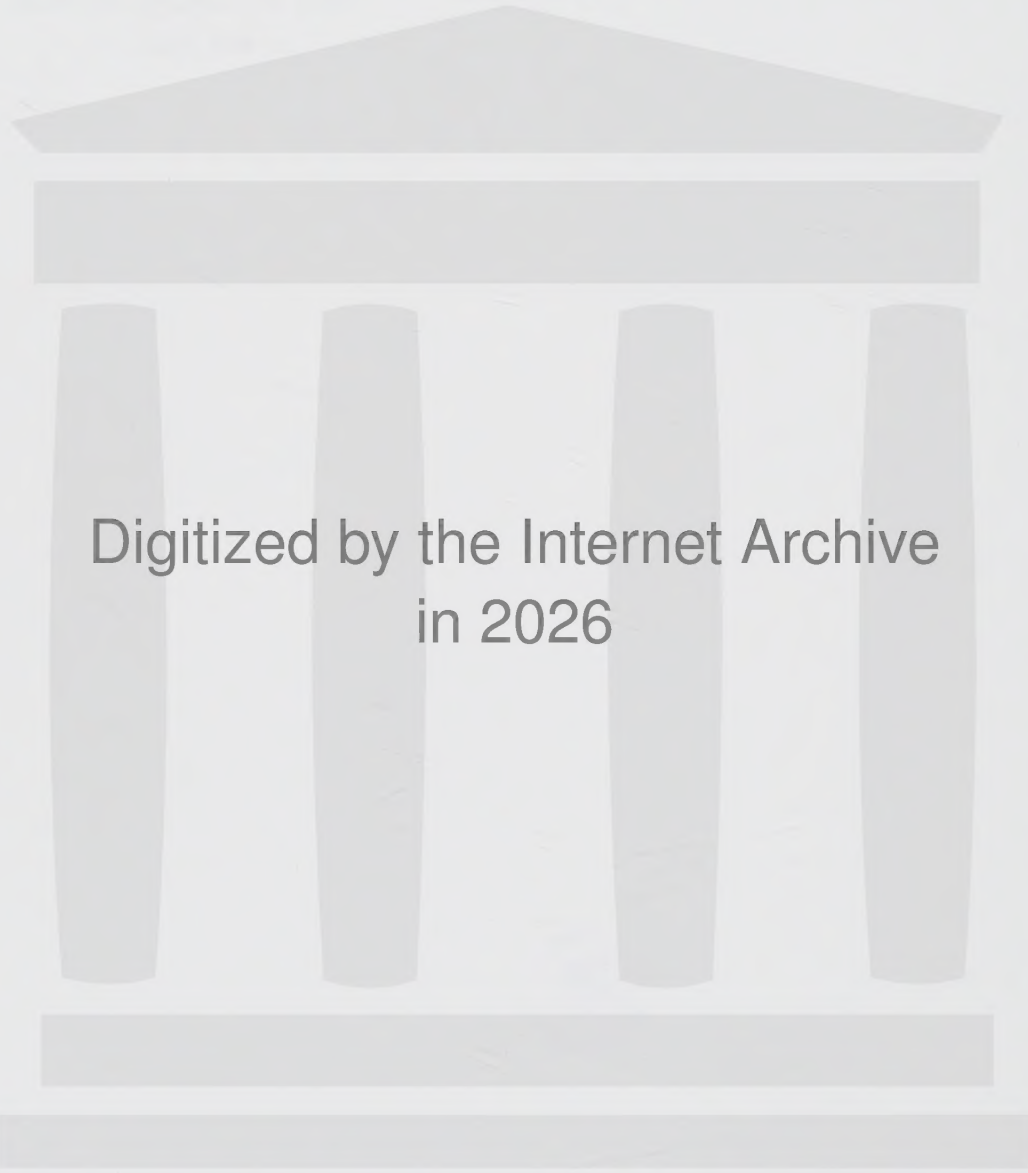
M. A. CRAYA

M. J. DODU, Rapporteur

M. A. COUMES

}
Examineurs

DEDIEE A LA MEMOIRE DE
RENE HUSSENOT-DESENONGES
MON PERE.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41533909_0025

Le présent mémoire rend compte d'un travail entrepris à l'Institut de Mécanique de Grenoble au sein duquel j'ai trouvé les directives, le soutien et la collaboration qui en ont permis l'achèvement.

J'exprime mes profonds sentiments de gratitude à Monsieur le Professeur J. KRAVTCHENKO, Directeur des Laboratoires de Mécanique des Fluides, qui m'a constamment offert un appui moral et un soutien matériel ; à Messieurs les Professeurs L. SANTON, Directeur Technique, et A. CRAYA, Directeur Scientifique, qui ont approuvé le projet de cette étude et ont aidé à sa réalisation ; à Monsieur le Professeur J. DODU qui, après m'avoir initié à la Mécanique des Fluides, a assumé la direction de cette recherche et a bien voulu m'accorder sa confiance et son amitié.

J'adresse mes sentiments de reconnaissance à Monsieur G. LESPINARD, Directeur de L'Institut de Mécanique de Grenoble, qui, dès sa prise de fonction dans cette nouvelle structure universitaire, a apporté un appui efficace à cette recherche ; à Monsieur le Professeur A. COUMES qui a bien voulu accepter de s'y intéresser en y apportant ses conseils et son jugement.

Les moyens matériels qui m'étaient nécessaires ont été en partie octroyés par le Ministère du Développement Industriel et Scientifique grâce au bienveillant intérêt de Messieurs les Inspecteurs Généraux G. LEVY et A. BUSSON à qui j'exprime mes remerciements.

Monsieur M. MARCHADIER a consacré son ingéniosité et sa ténacité à la conduite du modèle d'essai et au dépouillement des mesures ; Monsieur J. BAUDOIN a étudié et réalisé les circuits électroniques avec une compétence incontestable et une vive compréhension des phénomènes physiques ; que ces collaborateurs dévoués trouvent ici le témoignage d'une gratitude que je n'ai peut-être pas su leur exprimer de vive voix.

Je ne veux pas oublier les membres du Personnel de l'I.M.G. qui ont contribué à créer autour de moi une atmosphère de confiance et d'amitié ; Messieurs R. BOLCATO, J. GALLOIS et Y. LOUIS pour l'aide qu'ils m'ont apporté en prenant parfois en charge des tâches qui m'incombaient au Service Electronique ; à tous je dis mon amicale reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I - *SURFACES LIBRES FLUCTUANTES*

CHAPITRE II - *DETECTION*

II.1 Objet de la mesure	7
II.2 Principe de la détection	11
II.3 Caractéristiques imposées au microjet	12
II.4 Perturbation du signal électrique	14
II.5 Etalonnages	19
II.6 Possibilités d'exploitation	22

CHAPITRE III - *FLUCTUOMETRE DE SURFACE LIBRE*

III.1 Organisation générale de l'appareillage	25
III.2 Système de détection	25
III.3 Système de traitement de l'information	33
III.4 Système de mesure	51
III.5 Appareils annexes	73

CHAPITRE IV - *ESSAIS ET RESULTATS*

IV.1 Déroulement de l'essai	77
IV.2 Choix du temps d'intégration	77
IV.3 Performances du détecteur	78
IV.4 Performances de l'appareillage électronique	83
IV.5 Application à la dispersion des jets	84
IV.6 Conclusion	98

ANNEXE I - *FLUCTUOMETRE DE SURFACE LIBRE POUR MESURE IN-SITU*

ANNEXE II - *MISE EN OEUVRE DE L'INSTRUMENTATION*

REFERENCES -

NOTATIONS

$\bar{U}$	: vitesse moyenne de l'écoulement à surface libre
$\bar{u}$	: vitesse moyenne du microjet
Δ_p	: pression d'éjection du microjet
d_m	: diamètre de l'orifice de sortie du micro-injecteur
d	: diamètre du microjet
s	: section du microjet
$\ell(t)$	: variable aléatoire, longueur du microjet
$\bar{\ell}$	: valeur moyenne de ℓ
q	: écart quadratique moyen de ℓ
T	: température
ρ_m	: masse volumique du liquide formant le microjet
μ_m	: viscosité du liquide formant le microjet
ρ_e	: masse volumique du liquide constituant l'écoulement
x_0	: abscisse de la section origine des ordonnées
R_m	: nombre de Reynolds du microjet

ρ	: résistivité électrique du liquide formant le microjet
R	: résistance électrique du microjet
R'	: résistance électrique d'un volume liquide constitué par l'écoulement
I	: intensité du courant produit par le générateur de courant
i	: intensité du courant parcourant le microjet
$e(t)$	: variable aléatoire, différence de potentiel aux bornes du microjet
$\bar{e}$	: valeur moyenne de e
e_q	: écart quadratique moyen de e
e_r	: tension résiduelle aux bornes du microjet
τ	: temps d'intégration

- τ_p : taux de perturbation du signal électrique
 S : coefficient de sensibilité du détecteur
 P : puissance dissipée par effet Joule dans le microjet
 R_j : résistance de rang j d'un circuit électronique
 C_j : condensateur de rang j d'un circuit électronique
 Tr_j : transistor de rang j d'un circuit électronique
 E_m : valeur, affichée par le voltmètre, de la tension $\bar{e}$
 E_q : valeur, affichée par le voltmètre, de la tension e_q
 G_m : gain du voltmètre en mesure de E_m
 G_q : gain du voltmètre en mesure de E_q
 g : gain alternatif du fluctuomètre
 V, v : tensions d'alimentation des circuits électroniques

CHAPITRE I

SURFACES LIBRES FLUCTUANTES

L'étude des surfaces fluctuantes fait l'objet, à l'Institut de Mécanique de Grenoble, d'une tradition héritée des Laboratoires de Mécaniques des Fluides dans lesquels elle a été entreprise dès 1953.

Cette étude concerne une partie d'un domaine assez considérable de la Mécanique des Fluides qu'on peut caractériser de la manière suivante : un liquide et un gaz en présence déterminent la formation d'une surface libre; il existe un mouvement préalable d'un des fluides, généralement le liquide.

Ce domaine de la Mécanique appelle l'intérêt de la recherche en raison d'un champ d'application considérable : action du vent sur les océans; houles, sillages ; évolution des jets liquides, formation de gouttes, dislocation, pulvérisation ; application aux injecteurs de carburant (brûleurs, carburateurs) ; évolution de surfaces libres de canaux, notamment dans le cas des installations de laboratoire ; surfaces libres des cavités en écoulements rapides ou déprimés ; etc...

Bien que l'analyse quantitative des mécanismes qui déterminent la formation des surfaces libres soit souvent trop délicate pour aboutir à un résultat satisfaisant, on sait cependant que ces mécanismes dépendent essentiellement d'une part de l'état dynamique des écoulements, c'est à dire du champ des vitesses moyennes et du champ des vitesses de fluctuations turbulentes, et d'autre part des propriétés des fluides, masse volumique, viscosité, tension superficielle.

Ainsi, dans le cas du mouvement d'un liquide par rapport à un gaz préalablement immobile et dans des conditions telles qu'il existe une surface libre moyenne, la déformation de la surface libre, sa persistance dans le temps, ou sa destruction éventuelle par résolution en aigrettes puis en gouttes, trouvent leur origine dans l'énergie cinétique turbulente de particules animées de

vitesse possédant une composante perpendiculaire à celle du mouvement moyen.

Dans le cadre ainsi défini, on s'est intéressé, à Grenoble, à la dispersion des jets liquides dans l'air immobile. L'analyse des mécanismes et l'expérimentation ont été simultanément développées. On a aussi cherché à élaborer des moyens de mesure adaptés aux caractères particuliers du phénomène étudié. Du point de vue des applications, on a ainsi travaillé dans les domaines des jets liquides à grande vitesse (jets de turbines) ou à grande distance (lances d'incendie), des surfaces libres en canaux pour les ouvrages d'expérimentation en laboratoire, des surfaces libres limitant les cavités (profils portants, machines hydrauliques, engins sous-marins).

L'historique suivant résume les travaux entrepris et les résultats acquis.

En 1963, J. DODU [4] met en évidence l'influence des propriétés physiques des fluides sur le comportement de la surface libre d'un jet d'eau à symétrie axiale issu d'un injecteur fortement convergent et pénétrant à grande vitesse dans l'air préalablement immobile. Il s'agit d'une surface libre naissante dont l'évolution reflète directement la structure turbulente de l'écoulement liquide sous-jacent. Ainsi qu'on le souhaite, la forte convergence réduit considérablement le taux global de turbulence et les amplitudes des fluctuations géométriques de la surface libre sont petites. Dans ce cas, les courbures imposées à la surface libre sont assez grandes pour que l'énergie de surface soit comparable à l'énergie cinétique turbulente sous-jacente. Il s'ensuit, ce que vérifie l'expérience, que la tension superficielle joue un rôle essentiel dans l'évolution de la surface libre, et par conséquent dans toute la dispersion du jet.

D. HERAUD [9], dont le travail constitue une suite logique du précédent, entreprend une étude rationnelle de la géométrie des injecteurs. Il met en évidence la nécessité de distinguer les paramètres géométriques macroscopiques habituels (diamètres, courbures des raccordements, angles de cônes) qui déterminent la structure turbulente de la presque totalité du volume du jet (noyau central) lorsque le débit est fixé, et les paramètres microscopiques (aspérités, état de surface) qui déterminent la structure turbulente d'une mince couche de paroi analogue à une couche limite entourant le noyau et se trouvant exactement sous la surface libre naissante. Il montre que cette couche détermine

l'évolution du jet dans son premier parcours, mais que la dissipation visqueuse au sein de celle-ci, puis la diffusion de l'énergie cinétique turbulente du noyau, atténue complètement l'effet de couche de paroi dans l'évolution ultérieure du jet. En conclusion, il explique que s'il est très difficile d'obtenir des jets de dispersion identique à leur naissance, c'est parce qu'en l'état actuel des techniques de fabrication, on ne sait pas réaliser des injecteurs ayant dans leur partie terminale des états de surface rigoureusement identiques. Il montre que l'adjonction de redents de très petites dimensions mais localement très fortement convergents, dont l'effet est de laminier considérablement la couche de paroi, atténue notablement la première dispersion des jets, et il éclaire ainsi une voie vers la maîtrise de la dispersion des surfaces libres.

Les travaux précédents ont donné lieu à une étude approfondie des procédés de mesure et au développement du matériel correspondant. Le fait qu'une solution parfaite dans ce domaine n'ait pu encore être trouvée résulte de la nature même du problème qui impose certaines contraintes exclusives et oblige donc à s'en tenir à des compromis.

Caractériser la dispersion d'une surface libre, c'est, en définitive, effectuer une mesure -ou plusieurs mesures- satisfaisant aux exigences habituelles de précision, de justesse et de fidélité.

L'évolution dans le temps des surfaces libres étudiées, et leur forme dans l'espace à un instant donné étant aléatoires, les mesures ne peuvent retenir que des grandeurs définies statistiquement. Par conséquent, à la mention habituelle de la précision de la mesure se substitue celle de l'intervalle de confiance, compte tenu du coefficient de confiance choisi.

On remarquera aussi que, pour les surfaces libres peu dispersées qu'on a choisi d'étudier, les exigences relatives à la précision absolue et aux intervalles de confiance sont grandes, et rendent les mesures assez délicates et assez longues.

Des études expérimentales déjà entreprises sur ce sujet et ayant donné lieu à la mise en oeuvre de méthodes de mesure originales, concernant soit la pulvérisation de jets, soit, au contraire, l'évolution de surfaces peu dispersées.

Une technique optique, dite de "photomicrographie par transpa-

rence" dans laquelle une source lumineuse et un microscope sont situés de part et d'autre du milieu étudié, est utilisé par S.W. DIAMANT (1960) pour observer et photographier les différentes parties d'un jet de combustible.

En 1961, T.F. CHEN et J.R. DAVIS utilisaient une aiguille métallique, maintenue perpendiculaire à l'axe d'un jet, et établissant avec celui-là un contact électrique intermittent au passage des fluctuations de la surface. L'aiguille était reliée à un dispositif électronique qui enregistrait le nombre et la durée des contacts.

K. MUENZ et J.M. MARCHELLO développent en 1963 une méthode photographique qui s'appuie sur les propriétés de réfraction des ondes de surface; complétée par un dispositif stroboscopique, elle leur permet la mesure des amplitudes et des fréquences des ondes.

Un procédé désigné sous le nom de "semi-stroboscopie" permet à F. DEBEAUVAIS (1964) d'estimer la longueur moyenne de jet cohérent, la répartition statistique des gouttes étant étudiée par des dispositifs de photographie et de cinématographie ultra-rapides.

A Grenoble, c'est le souci d'écarter toute erreur systématique pour obtenir des mesures justes qui a guidé J. DODU dans le choix d'un procédé photographique dont on est assuré à priori qu'il ne perturbe pas le phénomène. Les mesures (rayon moyen du jet, écart quadratique moyen de la position du contour apparent) résultaient de l'exploitation statistique d'échantillons de photographie à très court temps de pose, prises suivant un axe perpendiculaire à la direction du jet, et sur lesquelles, en une abscisse donnée, on repérait par rapport à une référence géométrique fixe la position du contour apparent de chaque côté du jet. Il se trouve cependant que ce procédé introduit sur les résultats une influence qui provient de la courbure de la surface libre moyenne. C'est en effet selon le plan tangent à la surface libre moyenne que le phénomène est observé, et on conçoit que dans le cas d'une surface moyenne plane, par exemple, les photographies de contour apparent n'auraient enregistré que la crête absolue des fluctuations, et qu'ainsi, le procédé aurait perdu son intérêt.

C'est pour remédier à cet inconvénient que D. HERAUD a utilisé une sonde ponctuelle dont on peut fixer la position à priori de manière à réaliser une auscultation statistique dans le temps en un point donné choisi au voisinage de la surface moyenne. Le principe de l'appareil présente une analogie avec celui qui a déjà été utilisé par T.F. CHEN et J.R. DAVIS. La sonde, constituée par l'extrémité dénudée d'un fil électrique très fin isolé dans une gaine de verre effilée, est insérée dans un circuit électrique qui se referme par la masse du liquide elle-même. Un signal électrique révèle ainsi les périodes d'immersion ou d'émersion de la sonde. Au prix d'une erreur systématique due au phénomène de

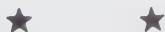
capillarité à l'extrémité de la sonde, on obtient , en déplaçant la sonde perpendiculairement à la surface libre moyenne, la fonction de répartition de la position de la surface libre suivant la direction de déplacement. Si l'on veut obtenir les paramètres statistiques élémentaires (position moyenne de la surface, et écarts quadratiques moyens), le procédé oblige, soit directement, soit indirectement, à effectuer la dérivation qui donne la densité de probabilité. Mais ce paramètre est encore un paramètre intégré et on ne peut envisager d'en déduire éventuellement des corrélations soit spatiales soit temporelles, dont l'intérêt est évident pour l'analyse des mécanismes d'évolution et de dispersion des jets.

L'expérimentation, puis la critique, des procédés de mesure évoqués ci-dessus nous ont conduit à rechercher un procédé présentant comme spécifications les deux possibilités suivantes :

- réaliser la détection de la position de la surface libre suivant un axe quelconque par rapport à la surface libre moyenne, et notamment suivant l'axe normal en chaque point à cette surface.
- enregistrer à tout instant la position de la surface libre sur l'axe choisi de manière que le résultat ne soit pas obtenu d'emblée sous forme intégrée.

Bien entendu, on ne devait pas non plus négliger la possibilité d'une traduction électrique de la mesure, à partir de laquelle on pourrait, à l'aide des procédés électroniques habituels, abréger considérablement les calculs de traitement. Enfin, on devait veiller soigneusement à conserver des qualités satisfaisantes de précision, de fidélité et de justesse.

Le présent mémoire rend compte du travail effectué et des résultats acquis en ce sens.



CHAPITRE II

DETECTION

II.1. Objet de la mesure

Les diverses méthodes déjà existantes, dont nous venons d'examiner les qualités et les défauts ne permettent pas de connaître l'état réel et instantané de la surface libre. En outre elles n'offrent pas toujours des caractéristiques telles qu'on puisse réaliser la mesure des très petites fluctuations de surface avec sensibilité, justesse et fidélité.

Pour connaître la position instantanée d'un point de la surface libre, nous avons analysé l'emploi éventuel de différents dispositifs, dont un système optique dans lequel l'intensité lumineuse d'un faisceau de rayons parallèles ou convergents, à travers une fenêtre judicieusement installée, pouvait être modulée par la position de la surface et recueillie sur un élément photosensible ; mais la présence de fluctuations de la surface en avant du plan de détection choisi modifiait la position réelle de ce plan. L'emploi d'un émetteur d'ondes ultrasoniques convergentes a dû aussi être abandonné parce qu'étant une source probable de formation de cavités au sein de l'écoulement. Il en fut de même pour l'utilisation d'ondes hyperfréquences, dont la réfraction ou la transmission aurait été fonction de l'épaisseur de l'écoulement, parce qu'elles sont fortement influencées par l'atmosphère humide régnant au voisinage de l'écoulement. Enfin, toutes les méthodes basées sur des éléments de détection inductifs ou capacitifs ne pouvaient nous permettre d'atteindre notre but, puisqu'elles se trouvent être des méthodes globales, ou qu'elles constituent la source de perturbations de l'écoulement.

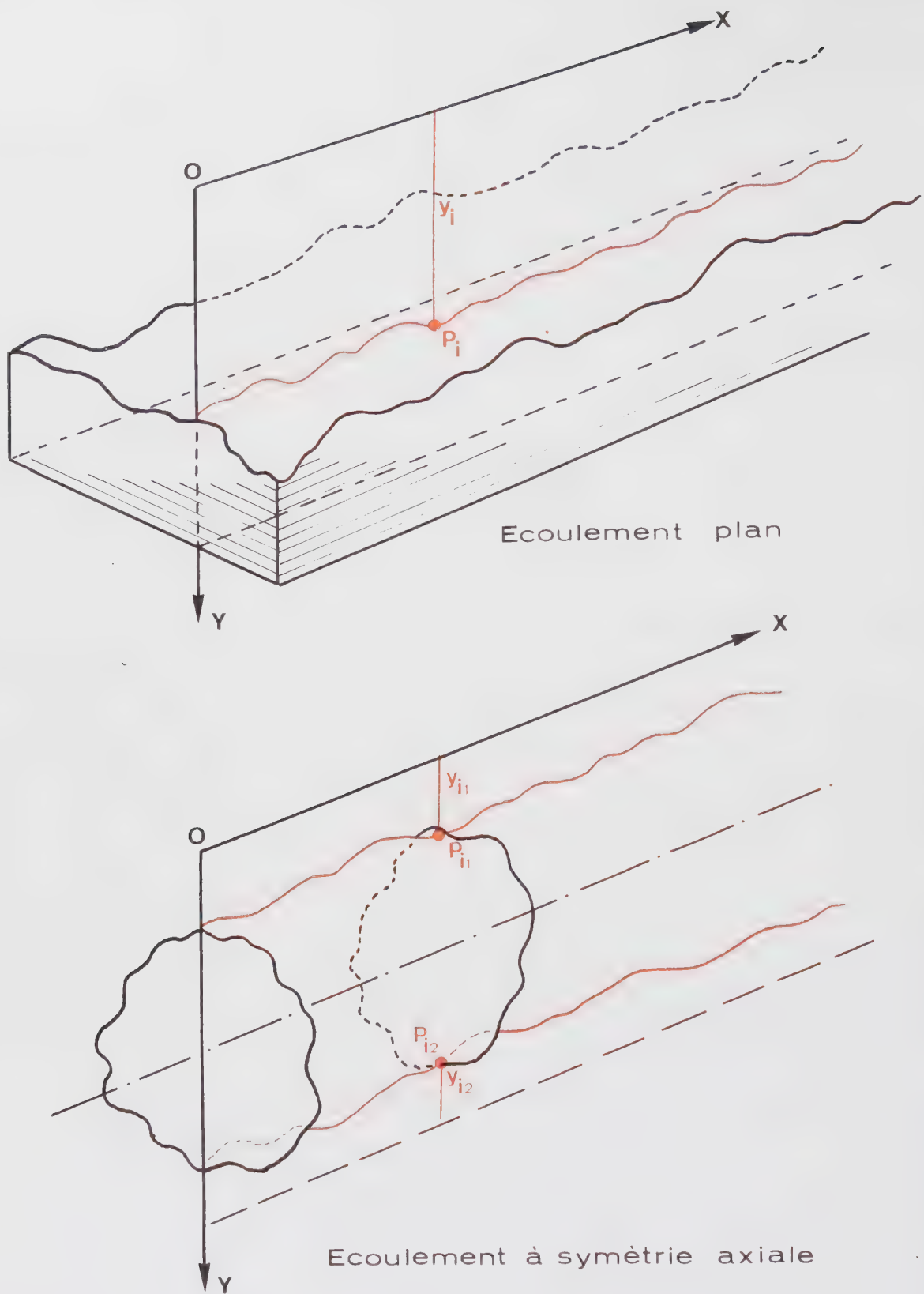


Figure 1 : Trace d'une surface libre sur un plan perpendiculaire à la surface moyenne

La méthode que nous avons adoptée permet d'atteindre comme paramètre de base une grandeur qui a une signification physique satisfaisante. Le choix de cette grandeur aléatoire, base de la mesure, est guidé par l'exploitation statistique que l'on en attend et par les conditions expérimentales que l'on souhaite simples et pratiques.

La méthode s'appuie sur la détermination de la position instantanée d'un point de la surface libre. Ce point est géométriquement repéré sur un axe choisi à priori perpendiculaire à la surface libre moyenne de l'écoulement qu'on cherche à étudier ; sur cet axe, on choisit une origine arbitraire.

Considérons une surface libre fluctuante limitant un milieu liquide en écoulement. La trace qu'elle détermine sur un plan fixe est une courbe aléatoire C ; ce plan est généralement le plan perpendiculaire au plan tangent à la surface libre moyenne qui contient la vitesse moyenne. Dans le cas d'un écoulement de révolution à symétrie axiale, il s'agit de la trace de sa surface libre sur le plan diamétral moyen (figure 1).

Cette courbe C peut être considérée comme représentant une fonction aléatoire de l'espace et du temps :

$$y = f(x, t)$$

On peut recueillir une information sur l'évolution de la surface soit à partir de $y(x)$ pour un instant t , soit à partir de $y(t)$ pour une abscisse x ; mais il faut remarquer que, du fait que le comportement de la surface libre est évolutif en fonction de l'abscisse à cause de la diffusion turbulente et de l'influence de la viscosité et de la tension superficielle, il est judicieux de rechercher l'information par l'évolution en fonction du temps à une abscisse donnée. On est ainsi amené à l'étude d'une variable aléatoire du temps ; à chaque abscisse x on associe la variable $y(t)$.

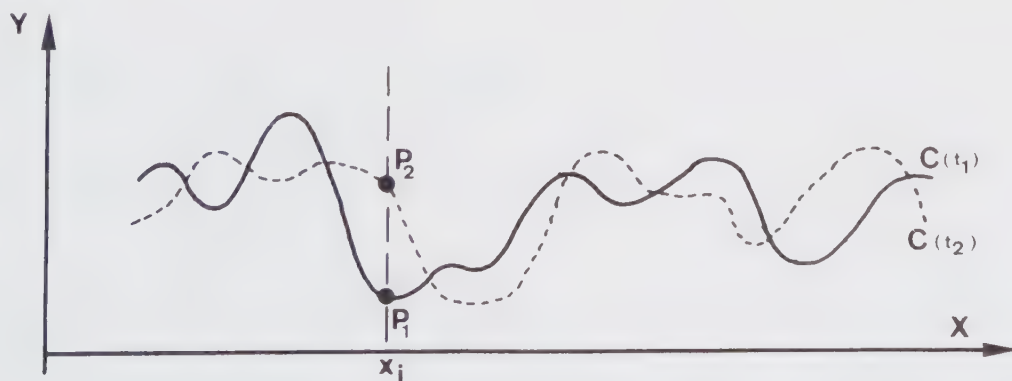


Figure 2

Ainsi, à l'abscisse $x = x_i$, un point **P** de la surface libre se trouve en **P**₁ d'ordonnée y_1 à l'instant t_1 , en **P**₂ d'ordonnée y_2 à l'instant t_2 . L'ordonnée de base de la surface libre est choisie en une abscisse $x = x_0$.

La connaissance de la fonction $y(t)$ permet de déterminer tous les paramètres statistiques pour l'abscisse considérée, notamment :

- la position moyenne de la surface

$$\bar{y} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t y(\lambda) d\lambda$$

- l'écart quadratique moyen

$$y_q = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t [y(\lambda)]^2 d\lambda$$

information relative aux fluctuations de la surface.

- l'autocorrélation temporelle

$$C_\tau = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t y(\lambda) \cdot y(\lambda - \tau) d\lambda$$

Dans le cas de la recherche de position de la surface libre d'un écoulement à symétrie axiale, telle celle d'un jet, il est intéressant de relever simultanément, dans le plan diamétral, les positions des contours gauche et droit, $y_1(t)$ et $y_2(t)$.

De la connaissance de ces deux variables, nous déduisons le rayon moyen

$$\bar{r} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t r(\lambda) d\lambda$$

où

$$r(\lambda) = \frac{a - [y_1(\lambda) - y_2(\lambda)]}{2}$$

avec $a = O'_1 O'_2$

La connaissance de deux variables y_1 et y_2 offre, de plus, la possibilité de déterminer les opérateurs corrélations :

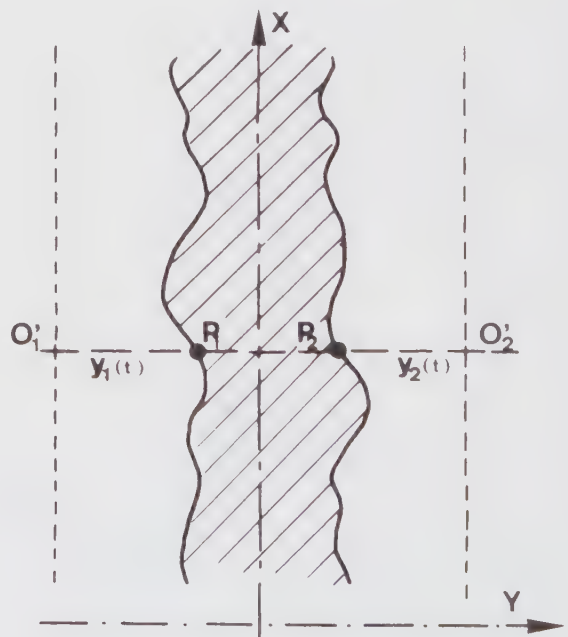


Figure 3

- les intercorrélations spatiales

$$C_s = \frac{y_1 \cdot y_2}{\sqrt{y_1^2} \sqrt{y_2^2}}$$

information relative aux vibrations d'ensemble.

- les autocorrélations spatiales

$$C_{as} = \left[y_1(t) \right]_x \cdot \left[y_2(t) \right]_x + \xi$$

information relative à l'évolution des tourbillons sous-jacents.

II.2 Principe de la détection

La variable $y(t)$ représente en fait la distance qui sépare le point **P** de la surface libre du point O' , origine arbitraire des ordonnées. La localisation dans le temps de ce point **P** est ainsi ramenée à la détermination d'une longueur ℓ telle que $\ell(t) = y(t)$.

Le principe de la détection utilisée consiste à matérialiser cette distance ℓ . On y parvient en utilisant un jet liquide de très petite section circulaire, ou microjet, frappant la surface libre suivant une direction perpendiculaire à son plan moyen.

Ce microjet, constitué par un fluide électriquement conducteur, présente une résistance électrique R telle que

$$R = \rho \frac{\ell}{s}$$

où ρ est la résistivité du fluide, ℓ et s la longueur et la section du microjet.

Le microjet étant parcouru par un courant électrique d'intensité i , la différence de potentiel qui apparaît entre ses extrémités est $e = Ri = \rho \frac{\ell}{s} i$

Ainsi, la mesure de la tension existante aux bornes d'un microjet dont on connaît la section et la résistivité est une mesure directe de sa longueur.

$$\ell = \frac{1}{\rho} s \frac{e}{i}$$

Il reste à veiller aux erreurs systématiques ; celles-ci sont, soit de nature hydraulique et elles concernent la déformation éventuelle de la surface libre par le microjet lui-même (cf. IV.5.4), soit de nature électrique et elles font l'objet du développement suivant.

II.3. Caractéristiques imposées au microjet

Pour que les variations dans le temps de la tension e aux bornes du microjet constituent une représentation simple des variations de la longueur ℓ , le microjet doit avoir des caractéristiques bien définies, répondant à des conditions particulières, tant physiques qu'électriques.

Une colonne liquide de longueur ℓ , de section s et de résistivité ρ présente une résistance électrique qui varie en fonction de la température suivant

$$R = \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{\ell}{s}$$

Dans cette expression, ρ_0 est la résistivité du liquide à 0°C et α le coefficient de température de la résistivité.

A un instant t , la longueur du microjet est

$$\ell = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha T)} s \frac{e}{i}$$

Imposer la proportionnalité de e à ℓ conduit à maintenir constant le terme $\frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha T)}$. Ce terme, faisant intervenir trois grandeurs indépendantes, la

section s du microjet, l'intensité i du courant le parcourant et la résistivité $\rho = \rho_0 (1 + \alpha T)$ du fluide le constituant, ne peut être constant que si toutes ces grandeurs le sont simultanément.

II.3.1. Résistivité

La résistivité d'un liquide dépend de sa composition chimique et de sa température ; il est donc nécessaire que ces deux paramètres soient invariables. Le fait que le liquide employé ne soit pas un liquide pur mais soit au contraire un mélange de plusieurs constituants implique que des précautions doivent être prises pour maintenir sa composition constante. Quant au maintien à température constante d'un circuit hydraulique un tant soit peu complexe, il exige la mise en oeuvre d'un équipement important et onéreux.

Il nous a paru plus opportun et plus efficace d'admettre des variations éventuelles de résistivité dans la mesure où nous pouvions à chaque instant en tenir compte.

Le choix de la valeur moyenne de la résistivité du microjet est, dans la pratique, limité par deux conditions essentielles : d'une part, la résistance moyenne du microjet doit être nettement plus grande que celle du volume liquide formé par l'écoulement à surface libre étudié, considéré en première appro-

ximation comme siège du potentiel électrique nul ; d'autre part, pour des raisons de sécurité, la différence de potentiel maximale apparaissant aux bornes du microjet ne doit pas présenter une valeur trop grande, car elle existe en fait entre deux éléments mécaniques du modèle d'essai que l'utilisateur doit souvent manipuler.

II.3.2. Intensité du courant

L'intensité du courant électrique qui parcourt le microjet peut aisément être maintenue constante par l'emploi d'un circuit électronique classique, générateur de courant continu invariable en fonction de la charge et de la source. La valeur, donc la stabilité, de l'intensité du courant fourni peut être vérifiée en permanence.

II.3.3. Section du microjet

L'obtention d'un jet liquide présentant un très petit diamètre pratiquement constant à partir d'une section proche de l'orifice de sortie, soumis de plus à l'influence de la gravité, ne peut être qu'approximative.

Il est donc nécessaire de contrôler l'obtention d'un tel jet à partir de l'expérience.

On cherche d'abord à éviter la dispersion du microjet en atténuant les fluctuations turbulentes de vitesse, engendrées par l'écoulement d'alimentation, par le choix d'une valeur élevée de la viscosité.

Des aspérités microscopiques, localisées notamment sur la partie terminale du micro-injecteur, risquent de perturber fortement le microjet, soit en le déviant, soit en engendrant la formation d'aigrettes. Ces aspérités résultent soit d'un défaut de fabrication soit d'un dépôt de particules contenues dans le liquide insuffisamment filtré. Dans les conditions d'écoulement retenues, l'expérience montre que les déformations ou les déviations du microjet ne sont pas perceptibles lorsque les dimensions des aspérités n'excèdent pas le micron.

En pratique, on choisit la valeur à donner au diamètre du microjet en tenant compte essentiellement des dimensions longitudinales minimales des fluctuations de surface que l'on veut déceler. Plus petit est ce diamètre, plus ponctuelle est la détection. Cependant, il ne faut pas oublier que tout écoulement à surface libre en mouvement rapide entraîne une couche d'air qui risque de modifier la direction initiale du microjet si sa section est trop petite.

En définitive, le diamètre du microjet ne peut être que le résultat d'un compromis qui satisfasse au mieux les diverses exigences.

Remarquons enfin que la nécessité d'obtenir une longueur non dispersée suffisante impose une contrainte supplémentaire qu'on satisfait en choisissant un nombre de Reynolds assez petit tout en conservant une vitesse assez grande.

II.3.4. Coefficient de sensibilité

Pour une résistivité déterminée, la section du microjet et l'intensité du courant qui le parcourt ayant été rendues constantes, la longueur instantanée est proportionnelle à la tension à ses bornes.

Le coefficient de proportionnalité S entre la tension e et la longueur ℓ , appelé "coefficient de sensibilité du détecteur" est défini par

$$S = \frac{de}{d\ell}$$

expression dans laquelle S est donné en volts par centimètre lorsque e est en volts et ℓ en centimètres.

II.4. Perturbation du signal électrique

Le microjet, parcouru par un courant d'intensité constante, animé d'un mouvement de vitesse u , frappe une surface liquide en mouvement à la vitesse U . Le signal électrique qui apparaît à ses bornes est un signal aléatoire qui représenterait exactement l'évolution dans le temps de la position du point de contact s'il n'était perturbé par des impulsions parasites. Ces impulsions, de durée relativement courte, ont une amplitude qui atteint souvent le niveau de la tension maximale qui peut exister aux bornes du microjet. Physiquement, elles correspondent à des interruptions momentanées dans la conduction électrique du microjet. Ces interruptions proviennent de phénomènes qui se produisent en trois domaines distincts :

- au sein même du microjet, par suite de la présence de particules solides ou gazeuses (bulles d'air dissous);
- au point d'impact avec la surface libre;
- autour du microjet, par rebondissement de particules liquides arrachées à l'écoulement au point d'impact et entraînées par la couche limite d'air.

Le signal électrique observé aux bornes du microjet a l'allure présentée sur la figure 4.

Si l'on considère que les moyennes temporelles effectuées lors des mesures sont le résultat d'intégrations sur un temps $\tau = t_2 - t_1$, la représentation de l'évolution du point de la surface libre détecté n'est vraie que pendant le temps $\tau' = \sum_0^{\tau} \delta \tau_i$

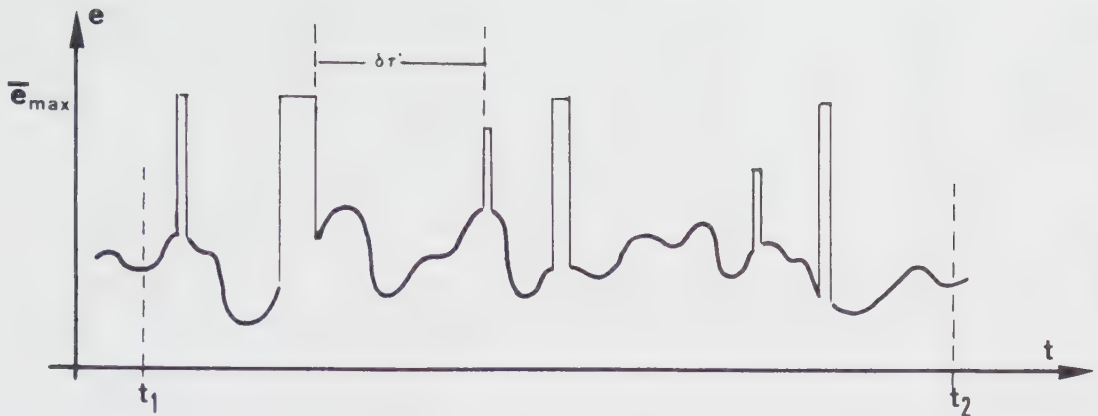


Figure 4

Nous définissons un "taux de perturbation " par

$$\tau_p = \frac{\tau - \tau'}{\tau}$$

Faute d'avoir pu annuler ce taux de perturbation, car il est impossible d'agir complètement sur les causes qui le déterminent, on a cherché d'abord à le rendre aussi petit que possible puis à en éliminer l'influence par un procédé de traitement du signal qui sera exposé ultérieurement.

Dès les premières expériences, il est apparu que la vitesse du microjet gouvernait d'une manière importante ce taux de perturbation. Une étude plus systématique a été entreprise sur ce sujet sous la forme suivante.

L'analyse globale du phénomène laisse penser que les paramètres essentiels qui régissent le microjet et son impact sur la surface libre sont :

- le diamètre du microjet, d
- sa longueur, l
- sa vitesse, u
- les propriétés physiques du fluide qui le constitue, masse volumique ρ_m et viscosité μ_m
- la vitesse de l'écoulement à surface libre, U
- sa masse volumique, ρ_e
- la masse volumique ρ_a de l'air environnant, en raison de l'entraînement de couche limite soit par le microjet soit par l'écoulement étudié.

Bien que les masses volumiques du liquide du microjet, ρ_m , et du liquide formant l'écoulement dont on étudie la surface, ρ_e , soient légèrement différentes, il ne semble pas, dans cette analyse, qu'il soit nécessaire de les distinguer. Dans ces conditions, le taux de perturbation τ_p dépend des paramètres indiqués:

$$\tau_p = f (d, \ell, \rho, \mu_m, u, U, \rho_a)$$

C'est à partir de cette fonction qu'on a cherché, par l'expérimentation, à mettre en évidence sous forme adimensionnelle, les paramètres essentiels.

La fonction correspondante s'écrit

$$\tau_p = F \left[\frac{\ell}{d}, \frac{\rho_a}{\rho}, R_j, \frac{u}{U} \right]$$

R_j étant le nombre de Reynolds du microjet.

Dans cette étude, le paramètre d'inertie ρ_a / ρ reste constant et son influence ne sera pas étudiée.

Les essais effectués, dont les résultats sont représentés sur les figures 5a et 5b montrent que le phénomène est profondément influencé par la longueur libre du microjet. On remarque sur la figure 5a, pour laquelle $\ell/d = 150$, que la variation du nombre de Reynolds semble rester sans influence sur l'évolution du taux de perturbation τ_p en fonction du rapport de vitesses u/U . Malgré la dispersion des résultats, probablement due à l'influence, non considérée, de la qualité du dégazage, on observe que le taux de perturbation présente un minimum accusé pour une valeur du rapport de vitesses un peu inférieure à 1.

Au contraire, sur la figure 5b pour laquelle le rapport ℓ/d n'est que de 100, on observe un déplacement systématique de l'évolution des courbes $\tau_p = f \left(\frac{u}{U} \right)$ en fonction du nombre de Reynolds du microjet. Compte tenu du fait que les valeurs assignées à ce nombre R_j garantissent seulement l'obtention d'un jet laminaire, dont le comportement ne semble pas devoir influencer à priori le taux de perturbation, on doit conclure que dans ce cas l'analyse précédente tombe en défaut.

Il y a lieu de penser que, pour cette longueur de microjet, l'épaisseur de la couche limite relative à l'écoulement étudié doit être prise en compte, mais le nombre d'essais effectués ne permet pas de confirmer cette hypothèse. L'existence d'un minimum du taux de perturbation en fonction de u/U n'apparaît plus.

De toutes façons, la longueur disponible correspondante du microjet se trouve, dans ces conditions, trop petite pour qu'on puisse explorer correctement les fluctuations géométriques escomptées.

En conséquence, nous avons veillé à conserver une longueur de microjet suffisante (telle que $\ell/d = 130$) et nous avons adapté les vitesses du microjet aux vitesses de l'écoulement de telle manière que leur rapport soit égal à 0,9.

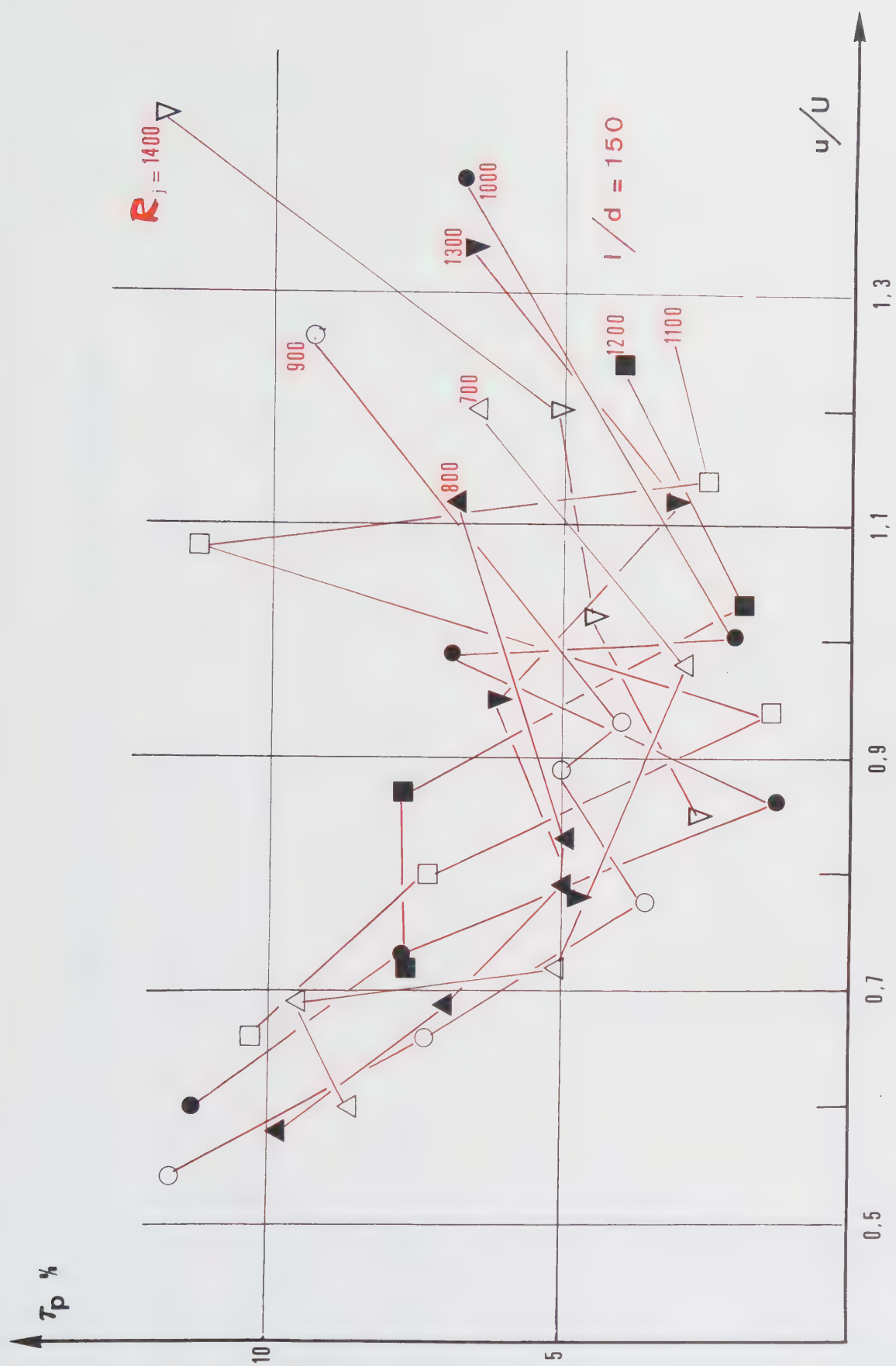


Figure 5a: Evolution du taux de perturbation

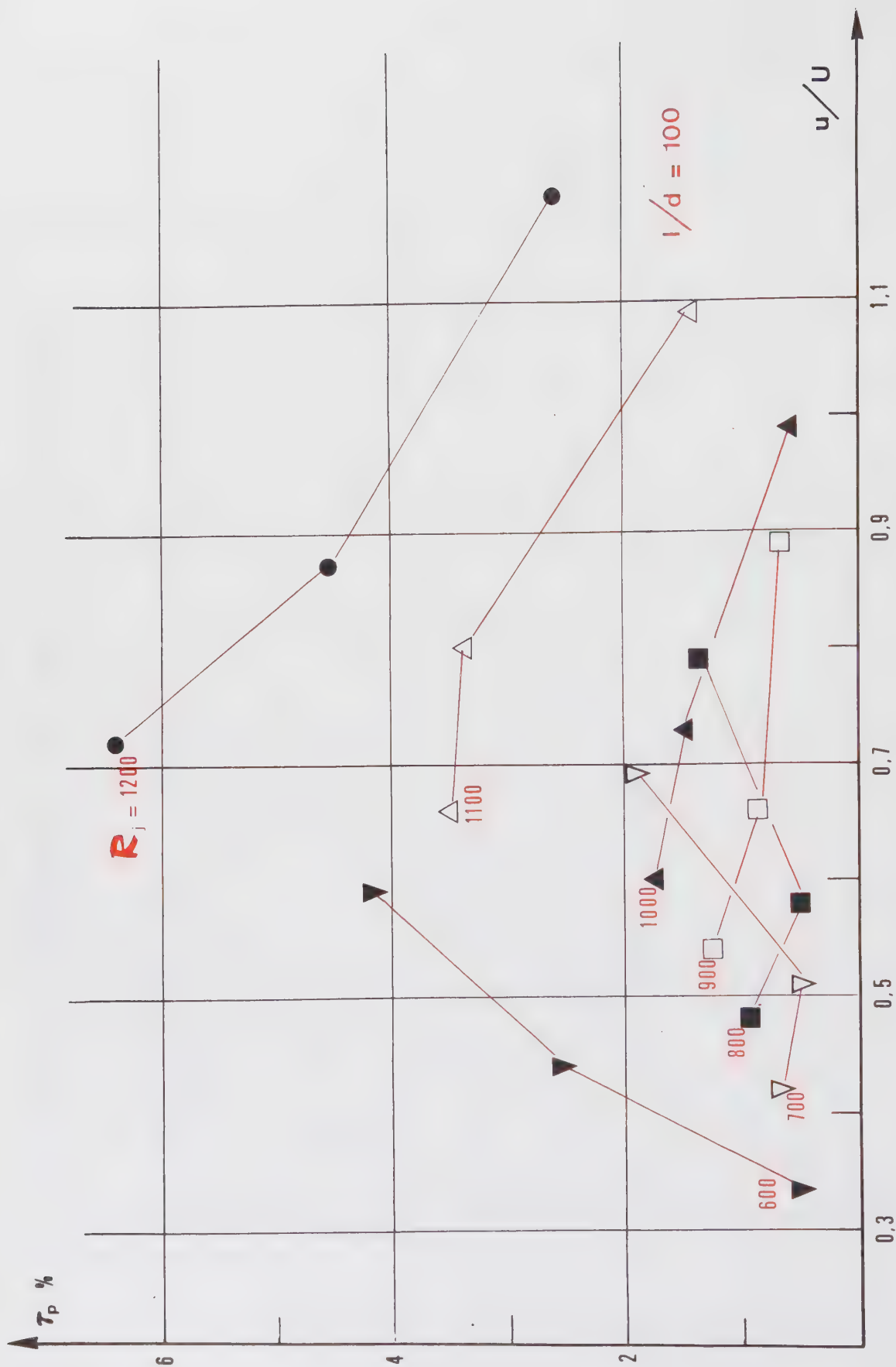


Figure 5b : Evolution du taux de perturbation

II.5. Etalonnages

L'étalonnage du système de détection par résistance liquide (microjet) consiste à relever les valeurs de la différence de potentiel existant entre les extrémités du microjet en fonction de la longueur de ce dernier, mesurée indépendamment.

II.5.1. Etalonnage sur surface solide

Un premier étalonnage est effectué lorsque le microjet frappe une surface solide. La position du point d'impact est alors facile à repérer et la longueur du microjet facile à mesurer. A priori, aucune perturbation n'est à redouter.

Le microjet frappe un cylindre en acier inoxydable suivant son plan diamétral horizontal ; la distance qui sépare le point d'impact **P** de l'orifice de sortie **O'** du micro-injecteur est mesurée à l'aide d'un comparateur, avec une précision meilleure que 0,01mm. Le micro-injecteur est au potentiel positif de la source d'alimentation en courant, la masse métallique du cylindre au potentiel zéro. La tension e recueillie aux bornes du microjet est visualisée sur l'écran d'un oscillographe et mesurée au moyen d'un voltmètre intégrateur. La perturbation engendrée par la surface solide sur le microjet au point d'impact n'a pas d'influence sur le calcul du coefficient de sensibilité S .

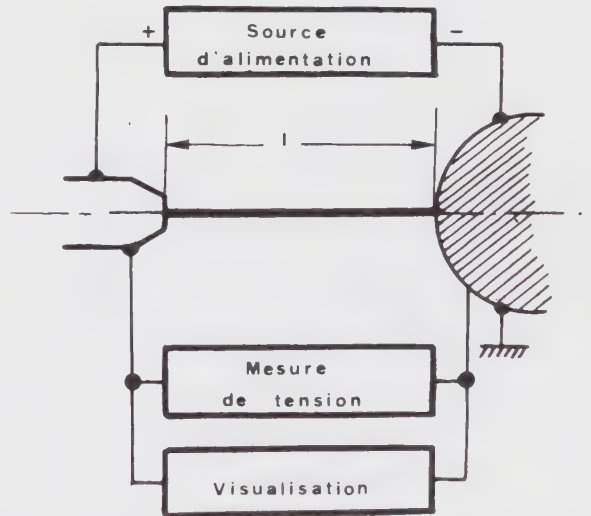


Figure 6

II.5.2. Etalonnage sur surface liquide

Un relevé similaire de la courbe d'étalonnage $e = f(l)$ est effectué sur une surface liquide. Le microjet est placé dans une section de l'écoulement où les amplitudes des fluctuations sont petites (certainement inférieures à 0,1 millimètre), son axe étant

perpendiculaire au plan tangent à la surface libre moyenne. La position "zéro" du micro-injecteur, position pour laquelle l est théoriquement nulle, est déterminée par contact avec la surface libre, celle-là étant portée au potentiel zéro de la source d'alimentation en courant. Ce repérage s'effectue avec une précision de 0,01 millimètre. Un comparateur, solidaire du micro-injecteur, assure ensuite la mesure des longueurs successives du microjet. Comme lors de l'étalonnage sur surface solide, la différence de potentiel e est mesurée et visualisée.

II.5.3. Résultats

La valeur instantanée de la résistivité du microjet étant continuellement relevée, on en tient compte lors des mesures de la tension moyenne $\bar{e}$ afin d'éliminer l'influence des variations de température.

Dans les deux types d'étalonnage, les résultats sont comparables :

- la tension moyenne $\bar{e}$ croît avec la longueur l du microjet, mais le signal $e(t)$ observé sur l'écran de l'oscillographe est perturbé par les impulsions parasites déjà signalées, dont la durée, l'amplitude et la fréquence sont aléatoires ;
- la réponse $\bar{e} = f(l)$ n'est pas linéaire dans toute la gamme de mesure ; pour les petites valeurs de l (inférieures à 6 millimètres) les valeurs correspondantes de $\bar{e}$ sont excessivement dispersées ; pour les grandes valeurs de l , les valeurs correspondantes de $\bar{e}$ croissent excessivement ;
- de l'extrapolation de la portion linéaire de la courbe $\bar{e} = f(l)$ ne résulte pas l'obtention d'une tension nulle pour une longueur nulle ; l'expérience a montré que la tension résiduelle, ou tension parasite, e_r est plus grande dans le cas de l'étalonnage effectué sur une surface solide que dans le cas où il est effectué sur une surface liquide.

L'influence des impulsions parasites peut être aisément éliminée au moyen d'un circuit de commutation qui empêche ces impulsions de parvenir au volt-mètre ; le temps d'intégration pris en considération est alors le temps τ' . Lorsqu'on effectue à la fois cette correction et celle qui résulte des variations de la résistivité au cours d'un essai, la courbe $\bar{e} = f(l)$ est une droite ; la tension résiduelle e_r subsiste. L'existence de cette dernière trouve sa justification dans la décomposition en mailles élémentaires du circuit électrique réel. La figure 7 montre que ce circuit est constitué de plusieurs impédances* en série :

* Ultérieurement, nous ne parlerons plus que de résistances ; l'influence capacitive de ce circuit est négligeable devant celle que présentent les circuits électriques et électroniques des appareils de traitement et de mesure.

- une impédance z_m , créée à l'intérieur du micro-injecteur par la répartition des lignes de courant, répartition influencée par la présence d'un élément isolant [cf. III.2.1.]
- L'impédance z de la colonne liquide constituée par le microjet
- une impédance de contact z_c
- l'impédance z_j de la colonne, liquide ou solide, dont les extrémités sont le point de contact du microjet et le point de potentiel nul (point de masse).

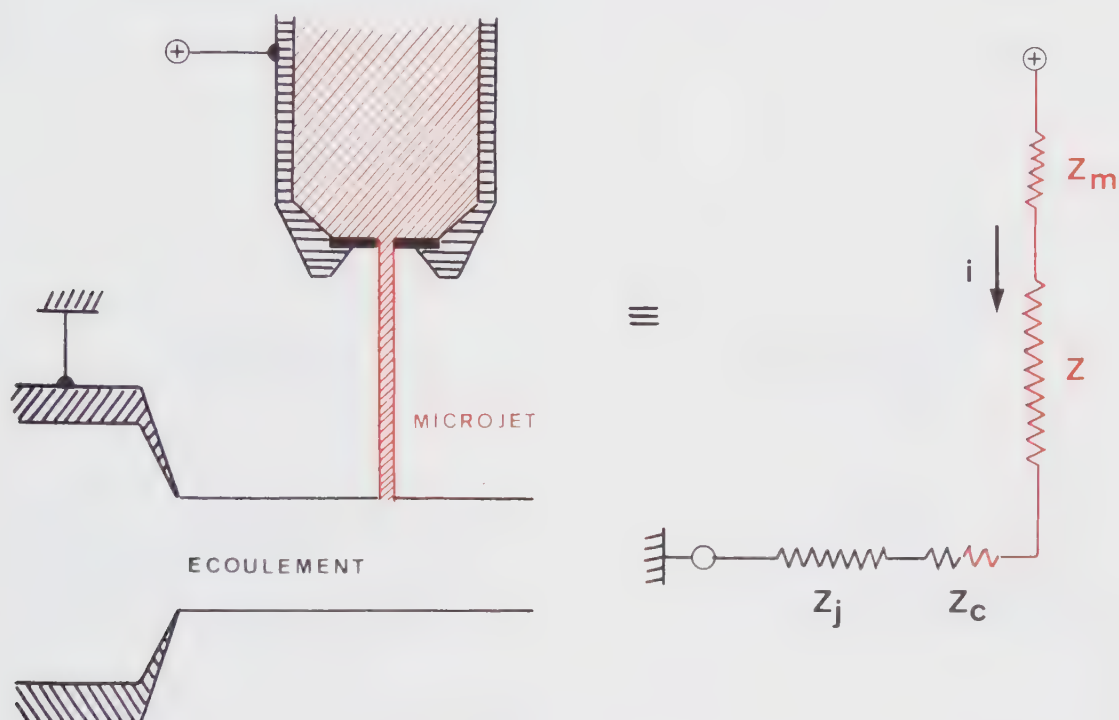


Figure 7

L'expérience montre en outre l'existence d'une tension de polarisation, force électromotrice due à un déplacement d'ions, semblable à celle qui se crée entre deux électrodes plongées dans un liquide conducteur parcouru par un courant électrique. La valeur de cette tension, e'_p , est plus grande dans le cas où z_j est l'impédance d'un volume solide que dans le cas où z_j est l'impédance d'un volume liquide, car dans ce dernier cas il s'agit de charges continuellement déplacées.

La tension E mesurée est alors égale à :

$$E = \left[z_m + z + z_c + z_j \right] i + e'_p = zi + \left[z_m + z_c + z_j \right] i + e'_p$$

$$E = e + e_r$$

La tension E est la somme de la différence de potentiel $e = Zi$ aux bornes du microjet et d'une tension résiduelle e_r qui ne peut s'annuler mais qui est invariable dans des conditions d'essai déterminées.

Dans l'hypothèse où le microjet frappe une surface liquide, les perturbations observées dans le signal obtenu pour les petites longueurs du microjet s'expliquent par la présence, autour de ce dernier, de particules liquides arrachées de la zone d'impact ; ces particules, se fixant sur la face avant du micro-injecteur, forment progressivement des gouttelettes qui, s'interposant entre le micro-injecteur et la surface libre, créent une impédance supplémentaire en parallèle avec l'impédance Z du microjet. Les particules et les gouttes étant parfois entraînées par la couche d'air proche de l'écoulement, l'existence de cette impédance parasite est aléatoire.

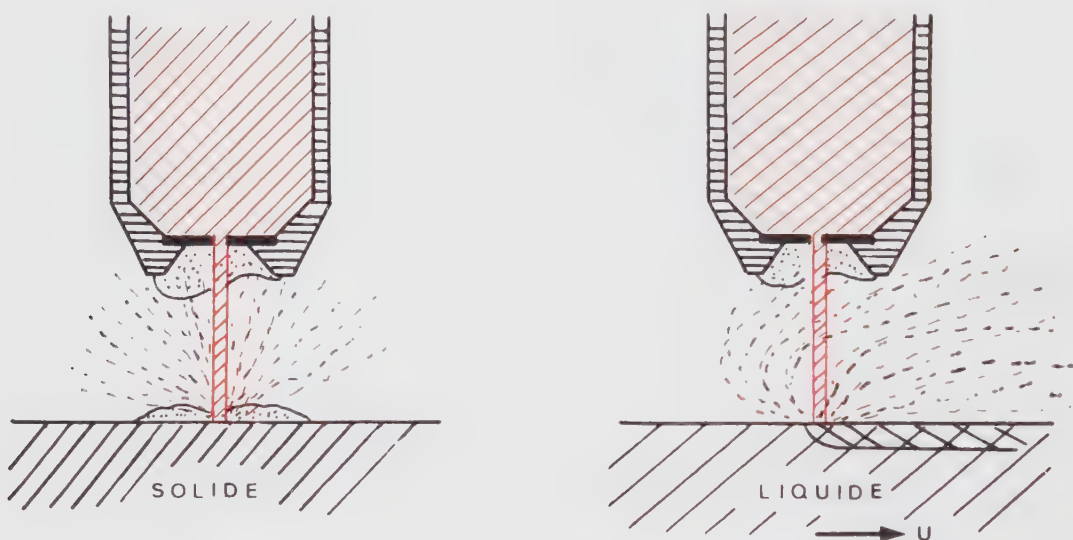


Figure 8

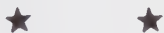
Dans l'hypothèse où le microjet frappe une surface solide, une impédance parasite comparable est créée par la formation d'une émulsion au point d'impact, émulsion dont le volume peut être relativement important ; d'autre part, la surface solide renvoie vers le micro-injecteur des particules liquides susceptibles de former des gouttes de la même manière que dans le cas de la surface liquide.

II.6. Possibilités d'exploitation

Les divers problèmes que nous venons d'évoquer ne sont apparus que lors des essais effectués. Ils montrent que l'utilisation d'un microjet de liquide conducteur comme détecteur de la position d'un point d'une surface libre en mouvement rapide ne peut se faire que moyennant certaines conditions.

Sur le plan physique, on doit tenir compte des liens qui existent entre les vitesses de l'écoulement et du microjet. La longueur de ce dernier doit avoir une valeur minimale, pratiquement égale à l'épaisseur de la couche limite d'air.

Sur le plan de la mesure au moyen d'instruments électroniques, plusieurs corrections doivent être apportées au relevé brut d'une tension. Les variations de température, donc de résistivité, doivent être prises en considération, soit automatiquement par le dispositif électronique lui-même, soit lors de la détermination de la position par calcul numérique. Enfin, toutes les perturbations dans la conduction électrique du microjet doivent être éliminées.



CHAPITRE III

FLUCTUOMETRE DE SURFACE LIBRE

III.1 Organisation générale de l'appareillage

L'appareillage de détection et de mesure, dénommé Fluctuomètre de Surface Libre, est composé de trois sous-ensembles :

- le système de détection, constitué d'un microjet de fluide conducteur satisfaisant aux conditions antérieurement définies, et son dispositif d'alimentation hydraulique ;
- le système de traitement analogique de l'information, dispositif électronique dont les rôles sont de fournir un courant électrique d'intensité constante au microjet, de recueillir et de traiter le signal obtenu aux bornes du microjet, de contrôler la résistivité instantanée du liquide composant le microjet ;
- le système de mesure de différence de potentiel conçu pour donner les valeurs moyenne et quadratique moyenne du signal qui lui est adressé.

A ces sous-ensembles sont adjoints des appareils de visualisation et d'enregistrement des diverses informations. Cet ensemble d'instruments électroniques est présenté sur la photographie de la figure 9.

III.2. Système de détection

Pour satisfaire aux conditions exposées précédemment, qui régissent l'emploi d'un microjet comme élément de détection, nous avons été amenés à choisir, pour ce microjet, le diamètre, le fluide et la vitesse d'écoulement.

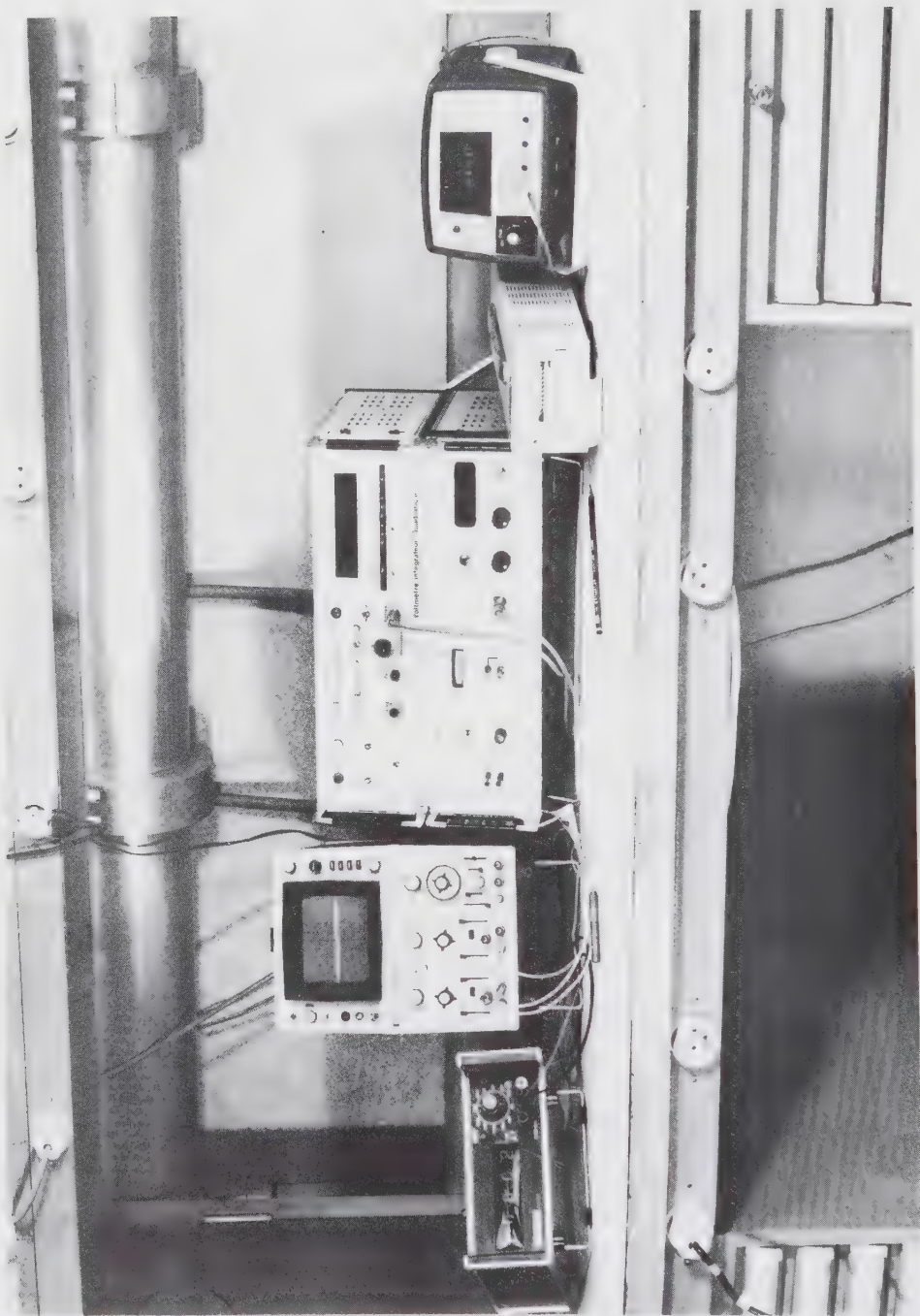


Figure 9 : *Appareillage de mesure*

III.2.1. Diamètre du microjet

Compte tenu de la dimension longitudinale des plus petites fluctuations que l'on veut déceler, $\delta x = 0,5$ millimètre, nous nous sommes fixé un diamètre de $0,1$ millimètre.

Le micro-injecteur réalisé est présenté en figure 10.

L'élément essentiel est une pièce en rubis synthétique à creusure conique, fournie par l'industrie mécanique de précision.

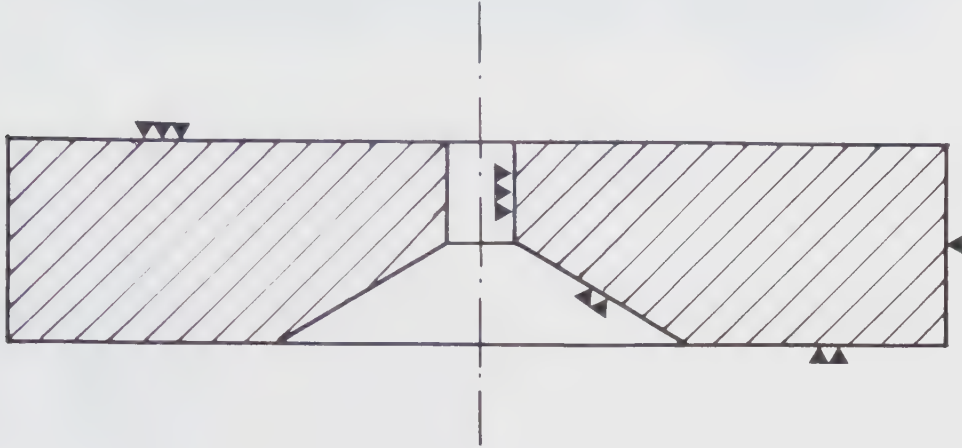


Figure 11

Le diamètre du trou central est de $0,1 \text{ mm} \pm 2 \mu\text{m}$, le diamètre extérieur de $1,40 \text{ mm} \pm 3 \mu\text{m}$, l'épaisseur de $0,30 \text{ mm} \pm 20 \mu\text{m}$. La profondeur de la section tubulaire de l'orifice est de $0,15 \text{ mm} \pm 30 \mu\text{m}$.

L'orifice qui donne naissance au microjet est constitué par l'intersection de la surface plane du rubis (située à la partie supérieure de la figure 11) et la surface cylindrique limitant la partie tubulaire. On dispose ainsi d'une arête vive, déterminée d'une manière très précise, de forme circulaire que l'écoulement du microjet quitte comme s'il s'agissait de l'arête d'un orifice en mince paroi.

Pour en faciliter la manutention et la fixation sur le micro-injecteur, ce rubis est enchâssé dans une pastille circulaire de diamètre 8 millimètres en acier inoxydable de même épaisseur, de telle sorte que la jonction entre le rubis et la pastille ne présente aucun décrochement, source possible de perturbation.

Le micro-injecteur proprement dit, réalisé en acier inoxydable, est constitué de trois éléments, raccordés par filetages :

- un chapeau, qui assure la jonction au conduit d'amenée du liquide, tube en plastique souple de $1,2$ millimètre de diamètre intérieur.
- un corps, convergent formé d'un cône d'angle $2 \times 60^\circ$ raccordé à un cylindre de 7 millimètres de diamètre, dont l'orifice terminal a un diamètre de 1 mm .

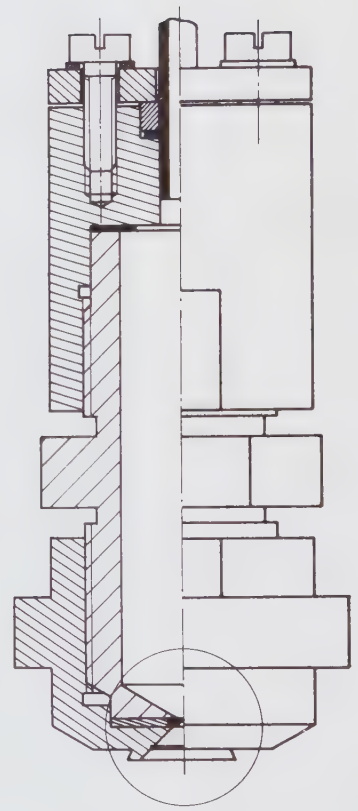
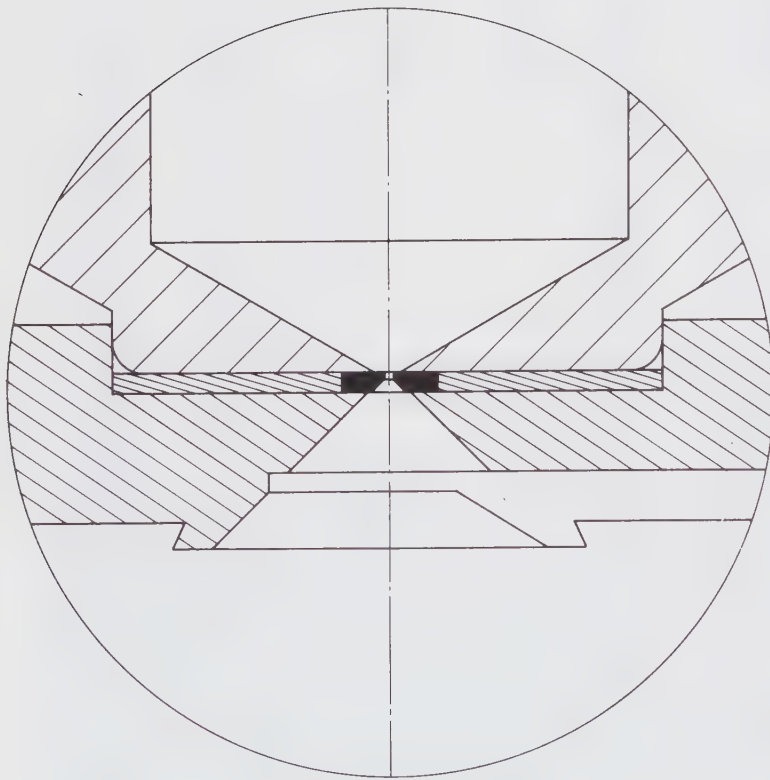
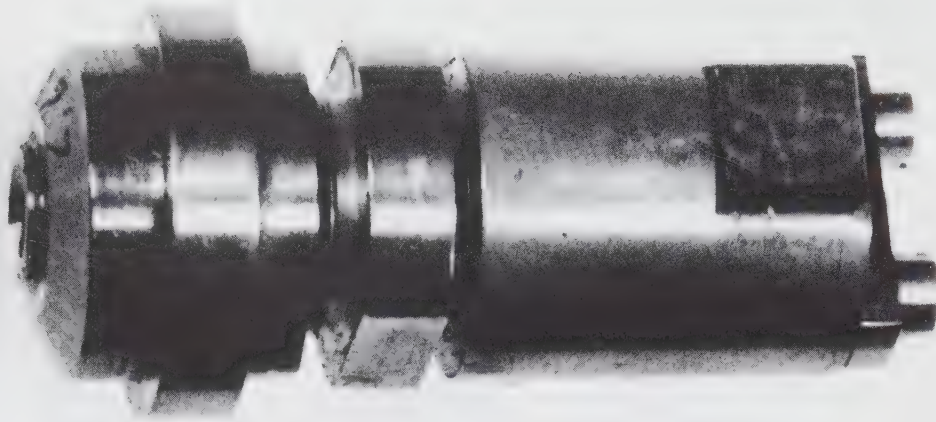


Figure 10 : *Micro - injecteur*

- une buse, dans laquelle s'encastre la pastille support du rubis.

L'alignement de ces éléments est réalisé à mieux que 0,01 millimètre.

L'étanchité est assurée par un joint plat en téflon entre le chapeau et le corps, par un joint cylindrique en plexiglass effectuant la liaison entre le conduit d'amenée et le chapeau.

L'expérience a montré que, compte tenu des conditions d'alimentation, la contraction globale ainsi obtenue, voisine de 5000 (en section) est suffisante pour atténuer le taux de turbulence transversale, et permettre d'obtenir l'écoulement laminaire souhaité pour le microjet.

Malgré la grande convergence déterminée par la dimension interne du corps, la dimension externe de l'ensemble n'excède pas 15 millimètres. C'est cette dimension qui fixe la distance minimale qui peut séparer deux microjets pour des mesures de corrélations spatiales.

Pour chaque micro-injecteur usiné, la distance qui sépare la face interne de rubis de la face externe de la buse est soigneusement mesurée ; cette distance correspond à une longueur morte du microjet que l'on doit prendre en considération lors des mesures. Nous disposons également d'une grande quantité de rubis préalablement enchâssés dans des pastilles ayant toutes le même diamètre extérieur.

Les perçages de deux rubis pouvant différer de quelques microns, les microjets correspondants peuvent avoir des caractéristiques relativement différentes. Dans la mesure du possible, chaque série de mesure est effectuée au moyen de la même pastille.

III.2.2. Fluide utilisé

Le liquide employé est une solution aqueuse de glycérine additionnée de chlorure d'ammonium, dont les proportions, en masse, **sont** les suivantes :

- . 50% d'eau distillée
- . 32% de glycérine bidistillée pour analyse
- . 18% de chlorure d'ammonium R.P.

Les caractéristiques de cette solution sont déterminées par les méthodes habituelles. La masse volumique ρ_m est mesurée à mieux que 0,1% par pesée d'un volume connu de fluide dans un picnomètre. Un viscosimètre capillaire donne la valeur de la viscosité μ à 1% environ. La tension superficielle τ_m , mesurée tant avec un tensiomètre à anneau de Lecomte du Noüy qu'avec un tensiomètre à lame de

Dognon-Abribat n'a pu être obtenue avec une précision supérieure à 5%. La résistivité ρ est déterminée successivement au moyen de deux conductimètres du commerce et du résistivimètre intégré à notre appareillage de mesure [cf. III.3.3]. Pour chacune de ces mesures, on recherche le coefficient de sonde en mesurant la résistivité d'une solution normale de chlorure de potassium, la sonde et la solution étant placées dans une enceinte thermostatée. Les valeurs obtenues permettent de déterminer la résistivité de la solution de chlorure d'ammonium à mieux que 0,1%.

Les caractéristiques des solutions liquides telles qu'on cherche à les obtenir à la température de 22,5°C sont les suivantes : $\rho_m = 1,13$ gramme par centimètre cube, $\tau_m = 70$ dynes par centimètre, $\mu_m = 2,84.10^{-2}$ poises, $\rho = 7,04$ ohms centimètre.

La présence de particules solides en suspension dans le liquide risque de provoquer des perturbations systématiques aléatoires par obturation partielle de l'orifice du micro-injecteur ; elles peuvent être évitées par filtration de la solution au moyen de filtres à fibres de verre dont les pores ont des diamètres de l'ordre de 4 microns.

En outre, l'expérience a montré que la présence d'air dissous dans le liquide provoque, au moment de la décompression auquel l'écoulement est soumis en traversant l'orifice de sortie du micro-injecteur, la formation de bulles qui modifient ou interrompent la conduction électrique du microjet. Pour remédier à cet inconvénient, on a dû procéder à un dégazage soigneux du liquide par agitation sous vide.

III.2.3. Vitesse du microjet

Le choix de la vitesse du microjet dépend de la vitesse de l'écoulement à surface libre étudié, des caractéristiques physiques de la solution liquide employée (notamment de sa viscosité) et de la longueur moyenne utile du microjet.

Le dispositif d'éjection doit donc permettre le réglage de la vitesse chaque fois que cela s'avère nécessaire. Un groupe moteur-pompe classique n'a pu être utilisé : le caractère corrosif du fluide aurait entraîné la détérioration des éléments mécaniques internes d'une telle pompe, et, inversement, le fluide aurait vu ses caractéristiques chimiques modifiées par introduction d'éléments indésirables, tels que des éléments ferreux. L'alimentation en fluide du micro-injecteur devant être continue, nous ne pûmes non plus envisager l'emploi d'une pompe à vibration.

Nous avons alors été amenés à employer un procédé d'éjection sous pression gazeuse. Le dispositif mis au point utilise un accumulateur pneumatique, bouteille en acier présentant deux compartiments séparés par une membrane souple étanche. Le compartiment inférieur contient le liquide ; dans le compartiment supérieur peut être introduit le gaz sous pression sans qu'il y ait mélange de gaz et de liquide, donc réengazage de ce dernier.

Le gaz employé est de l'azote ; la pression de sortie est réglée et stabilisée par un mano-détendeur, relevée par un manomètre.

La vitesse moyenne $\bar{u}$ du microjet, à la sortie du micro-injecteur, est, pour une solution liquide et un micro-injecteur donnés, proportionnelle à la racine carrée de la pression d'éjection. Ainsi, la vitesse peut être déterminée à partir de la pression, la constante de proportionnalité étant définie par la mesure de la vitesse à une pression donnée. (Par exemple, en imposant au micro-injecteur une vibration transversale de fréquence connue et en mesurant la longueur d'onde des ondes résultantes sur le microjet). En pratique, la valeur absolue de la vitesse du microjet n'ayant pas une importance prépondérante, et les débits étant très faibles, nous avons supposé négligeables les diverses pertes de charge du circuit hydraulique et nous avons déterminé une vitesse moyenne théorique au moyen de la relation

$$\bar{u} = 2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_m}}$$

où Δp est la pression sous laquelle arrive l'azote comprimé, et ρ_m la masse volumique de la solution liquide.

III.2.4. Réalisation pratique et utilisation

Le dispositif complet d'éjection du microjet est présenté en fig.12.

Il est constitué par :

- un réacteur à vide, ballon en pyrex dans lequel est entreposée la solution liquide homogénéisée en vue d'une désaération par agitation sous vide. Le vide est obtenu au moyen d'une pompe.
- un accumulateur pneumatique, d'une capacité de 20 litres, comprenant:
 - . une bouteille en acier forgé, usiné, sans soudure, protégée intérieurement par une couche de vernis époxy à 100 microns. La pression utile maximale est de 170 bars;
 - . une vessie en caoutchouc synthétique Butyl, sans valve d'air, modèle à crépine en métal fritté (une calotte supérieure en butyl, adhésivée sur embase de valve, un ensemble crépine, un clapet de sécurité et un adaptateur de gonflage et de contrôle);

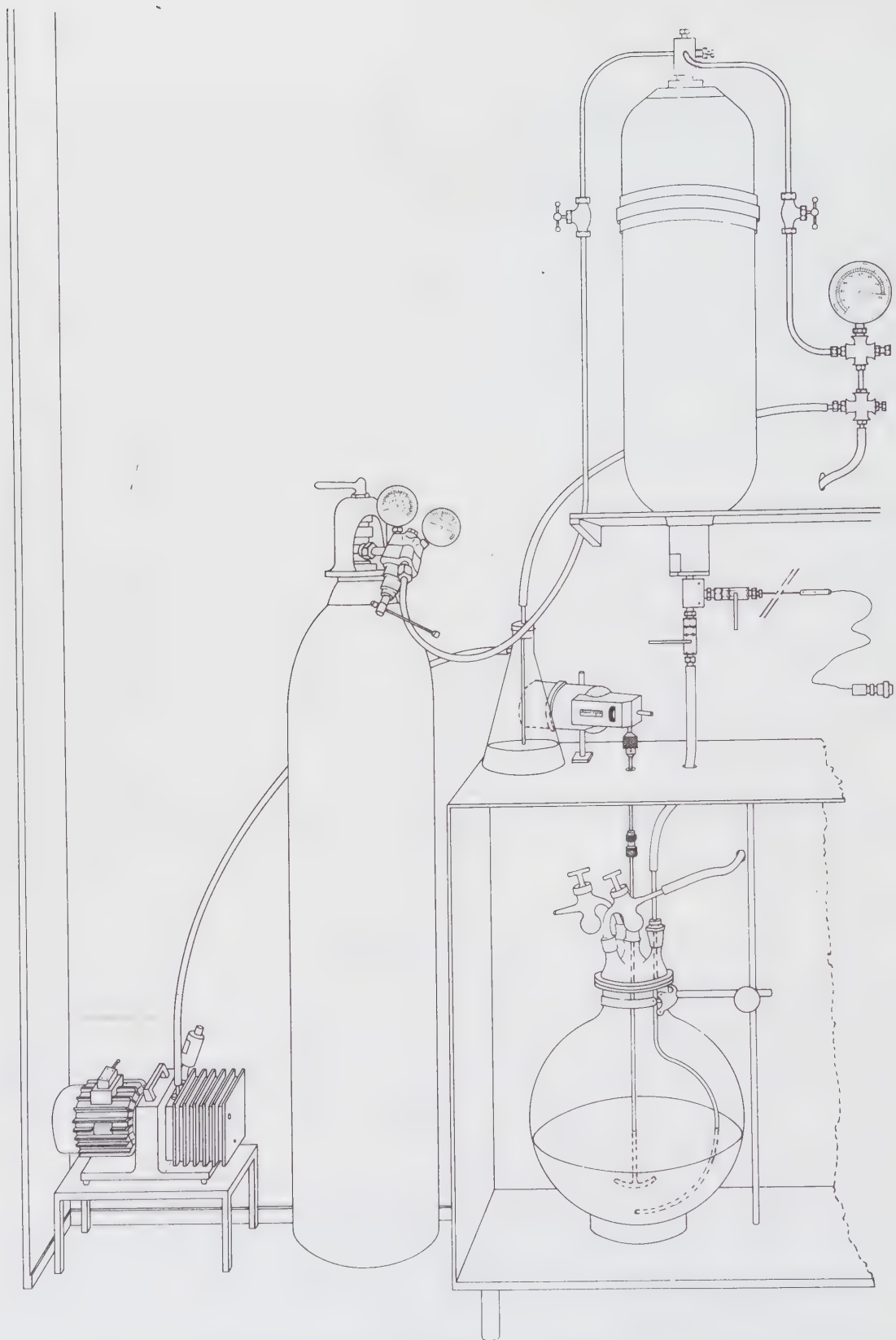


Figure 12 : **Dispositif d'alimentation hydraulique
d'un micro-injecteur**

- une bouteille d'azote comprimé;
- divers robinets, tant en amont qu'en aval de l'accumulateur;
- une conduite rigide, prolongée du tube plastique souple assurant la liaison hydraulique avec le micro-injecteur;
- le micro-injecteur, maintenu rigidement sur un chariot de mesure.

Toutes les pièces métalliques, autres que l'accumulateur, en contact avec le liquide, sont en acier inoxydable.

Il a été nécessaire d'installer, autour du micro-injecteur, un carénage en plexiglass remplissant un double rôle de protection et d'isolement. Il évite d'une part les projections d'eau préjudiciables à l'entretien des systèmes mécaniques de précision qui équipent le chariot et qui rendent les mesures impraticables. D'autre part, il empêche l'établissement de tout contact électrique entre la buse du micro-injecteur et la masse par l'intermédiaire du nuage de particules qui se détache de l'écoulement au point d'impact du microjet.

Nous avons également cherché à maîtriser le ruissellement de l'eau déviée par le microjet et à limiter l'influence du film liquide qui se forme sur la buse du micro-injecteur.

Ce problème d'isolement a été très délicat à résoudre, d'autant plus qu'il fallait donner des dimensions réduites au support du micro-injecteur, conserver la mobilité que requiert son réglage et assurer l'interchangeabilité des pastilles supports des rubis.

Dans le cas de l'emploi simultané de deux détecteurs à microjet, le dispositif est doublé comme le montre la photographie de la figure 13.

La solution liquide, soigneusement homogénéisée et filtrée, est introduite dans le réacteur, puis désaérée. Le vide ayant été effectué dans les deux compartiments de l'accumulateur, on laisse pénétrer un faible volume d'air dans le réacteur, créant ainsi une différence de pression entre ce dernier et le compartiment inférieur de l'accumulateur lequel se remplit de liquide. Cette opération présente l'inconvénient de réengazer partiellement le fluide ; elle doit s'effectuer le plus rapidement possible. L'ensemble est alors prêt à l'emploi. L'azote, injecté sous pression dans le compartiment supérieur de l'accumulateur, force la membrane souple à éjecter le liquide vers le micro-injecteur.

III.3. Système de traitement de l'information

Fournir un courant électrique d'intensité constante au microjet, capter la différence de potentiel apparaissant à ses bornes, l'amener à un niveau qui en permette la mesure avec une précision suffisante, éliminer l'influence des parasites qui en affectent la justesse, et mesurer la résistivité instantanée,

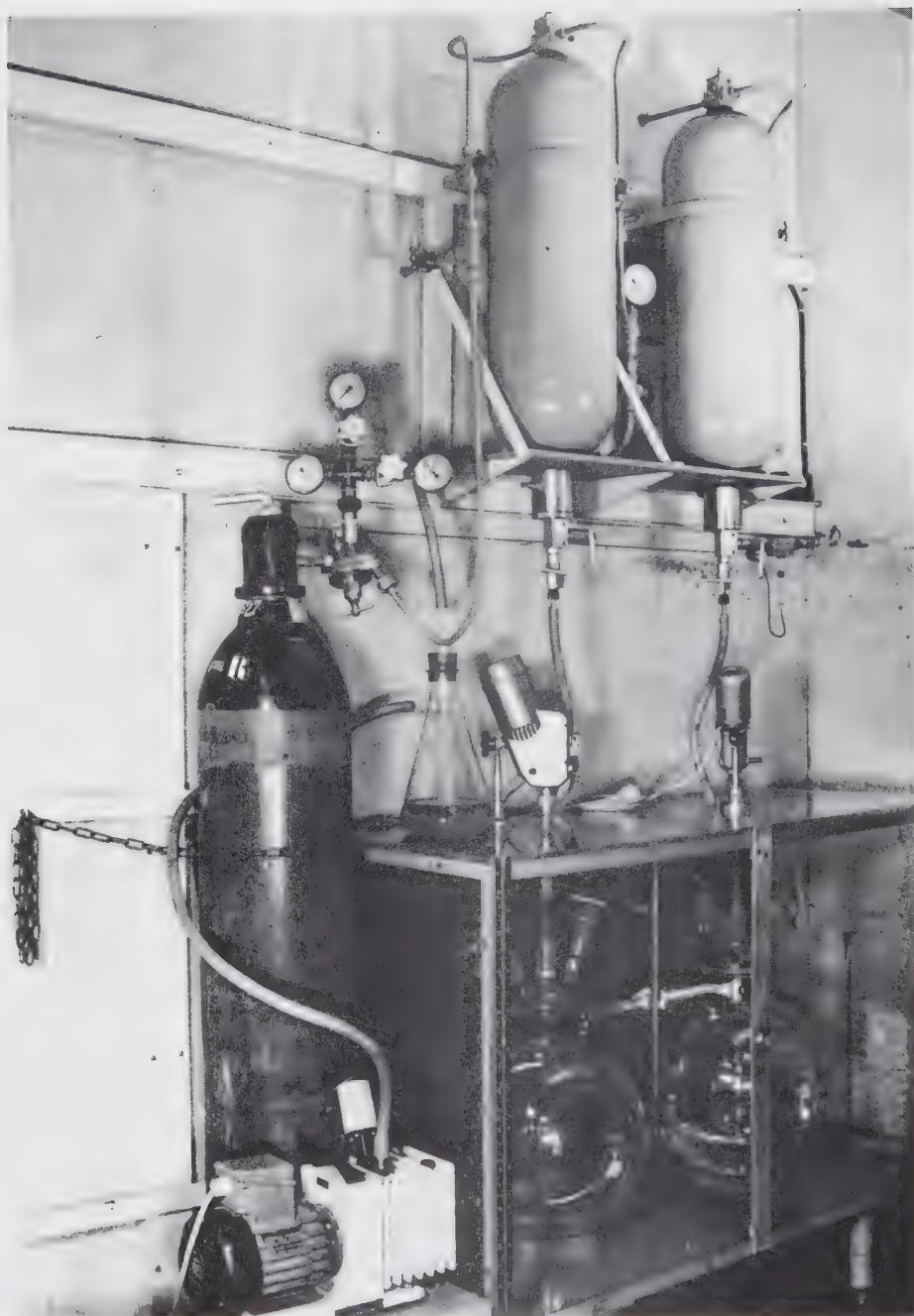


Figure 13 :

Dispositif d'éjection pour double détection

tels sont les rôles du système de traitement. L'organigramme de la figure 14 montre la structure du système en en présentant les divers éléments et leurs rapports respectifs.

Le microjet est parcouru par un courant continu d'intensité i fourni par un générateur. L'écoulement principal (écoulement à surface libre) est, en première approximation, au potentiel de masse. La résistance moyenne $\bar{R}$ du microjet ($\bar{R} \approx 120$ kilohms) est grande devant la résistance moyenne $\bar{R}'$ formée par l'écoulement principal, entre point de contact et point de masse ($500\Omega < \bar{R}' < 10K\Omega$). Dans une configuration déterminée, la différence de potentiel aux bornes de R' peut être considérée comme invariable, ses variations dans le temps étant relativement très faibles. La tension $e(t)$ relevée entre le micro-injecteur (pôle positif) et le point de masse (pôle négatif) fournit une information sur la longueur $\ell(t)$ du microjet. Nous pouvons écrire :

$$e(t) = \bar{e} + \Delta e + e_r = i \left[\bar{R} + r \right] + e_r \equiv k \left[\bar{\ell} + \Delta \ell \right] + \ell_r$$

où ℓ_r est une longueur fictive, invariable dans des conditions d'essai déterminées, correspondant à la tension résiduelle e_r .

Cette tension $e(t)$ est injectée dans un amplificateur dont le signal de sortie attaque un discriminateur à seuil ayant pour fonction d'éliminer l'influence des signaux parasites.

Le dispositif est complété par un résistivimètre qui assure le contrôle permanent de la résistivité du microjet, donc de l'influence de la température sur les relevés de mesure.

III.3.1. Générateur de courant

La différence de potentiel maximale aux bornes du microjet est fixée à 60 Volts. Une étude préliminaire de la sensibilité en fonction de l'intensité du courant parcourant le microjet nous a conduit à adopter pour celle-là une valeur de 280 micro-ampères (figure 15).

La résistance optimale théorique du microjet est ainsi limitée à 215 Kilohms ; c'est la résistance d'une colonne de liquide de résistivité 7 ohms. centimètre de 24 millimètres de longueur, de 0,1 millimètre de diamètre. La sensibilité S obtenue est de l'ordre de 2,5 Volts par millimètre. Cette valeur n'est que théorique ; elle ne tient pas compte de l'influence de la tension résiduelle e_r . Mais nous pouvons d'ores et déjà constater l'extrême sensibilité atteinte : à une variation de longueur du microjet de 1 micron correspond une variation de tension de 2,5 millivolts, qui peut être mesurée avec une précision de $\pm 10^{-2}$ millivolt, soit avec une erreur de l'ordre de $\pm 0,5\%$.

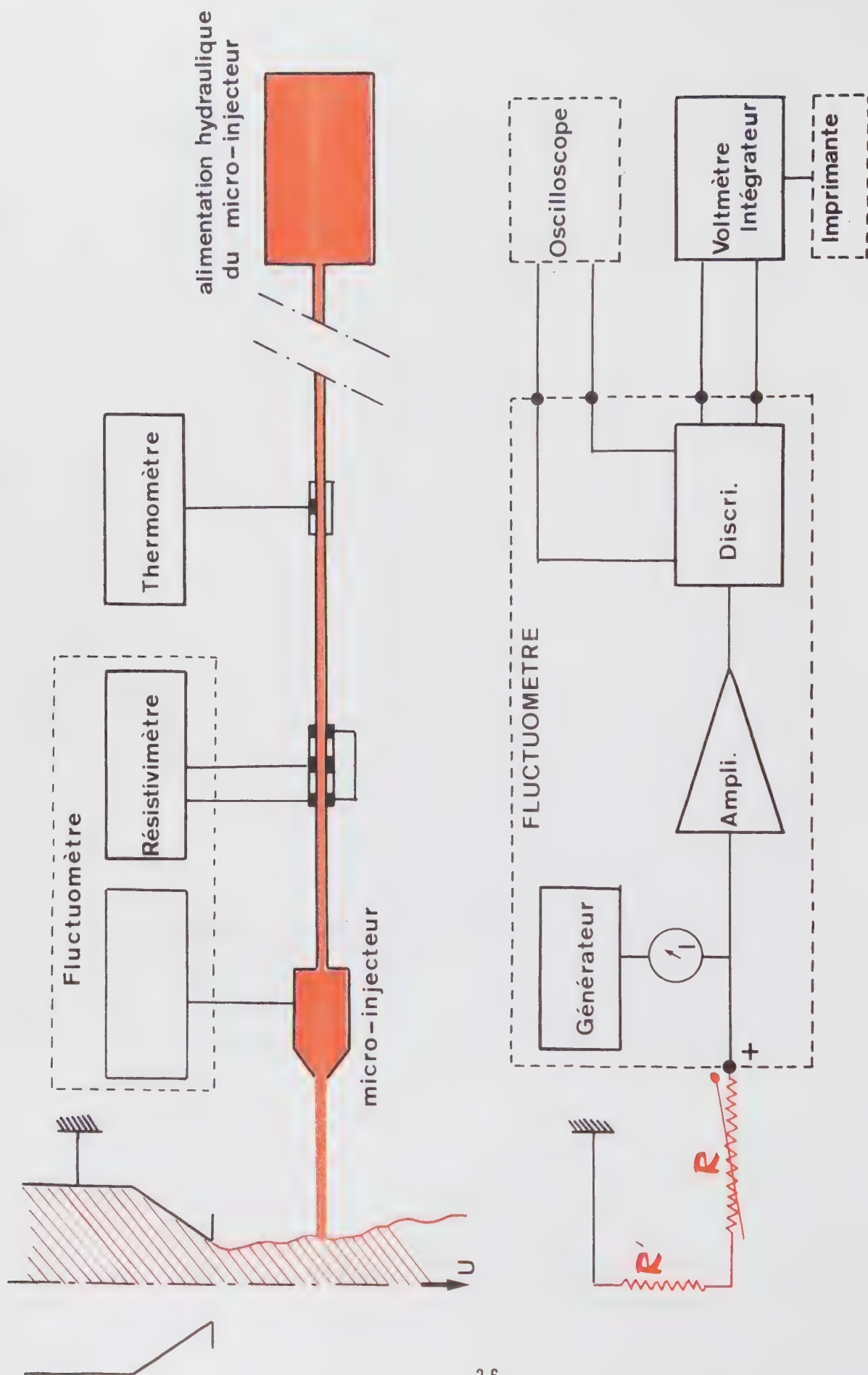


Figure 14 : *Organisation*

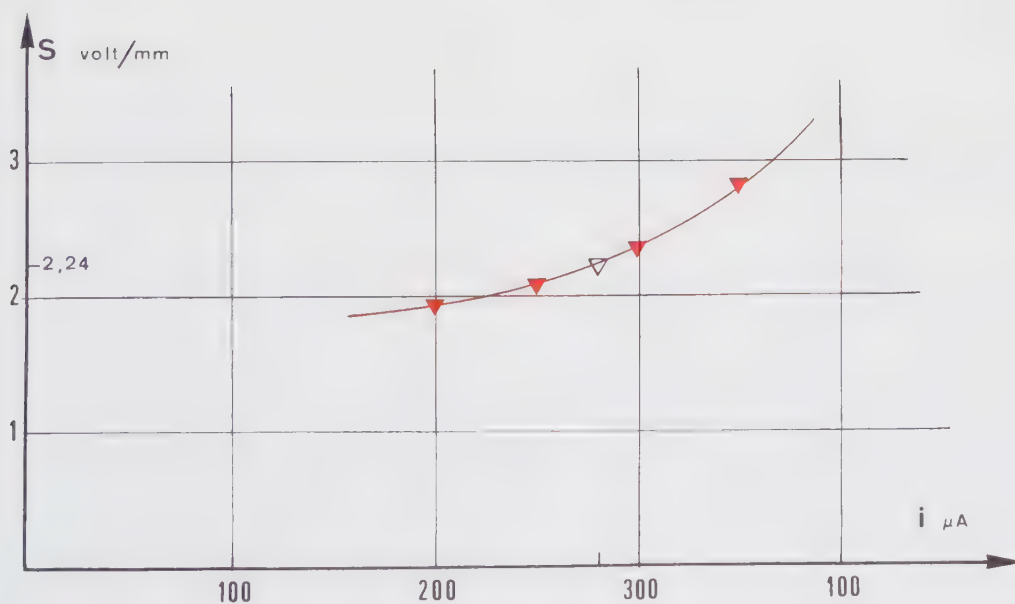
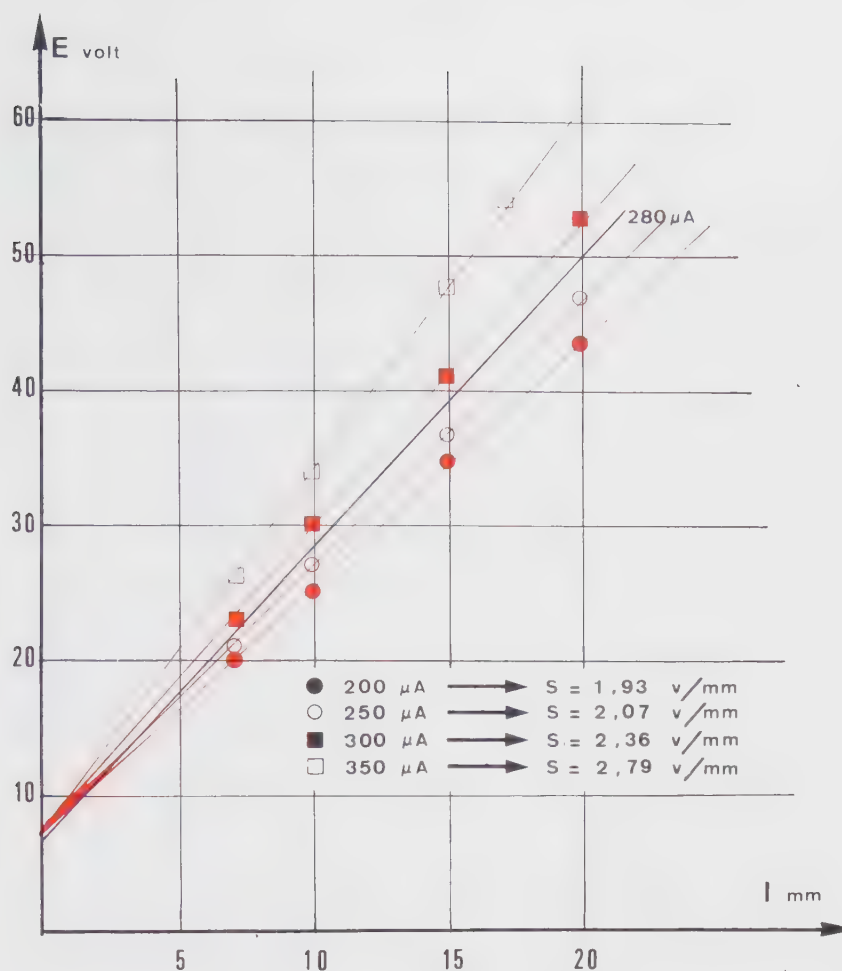


Figure 15: Evolution de la sensibilité s en fonction du courant i

Le schéma de réalisation du générateur de courant est représenté en figure 16. Le circuit adopté utilise deux transistors. La chute de tension aux bornes de la résistance r est comparée à la tension base-émetteur du transistor comparateur T_2 . La tension apparaissant aux bornes de cette résistance est une mesure du courant de T_1 . Le montage forme une boucle de contre-réaction qui tend à maintenir constant le courant de T_1 . Cependant, le courant d'attaque doit être fourni au collecteur de l'amplificateur à travers une résistance ; il en résulte une limitation dans la stabilisation du courant. Une compensation est assurée par une résistance en série dans la base de T_2 . Il est alors possible d'obtenir une stabilisation à 10^{-3} près quelles que soient les variations de la tension d'alimentation.

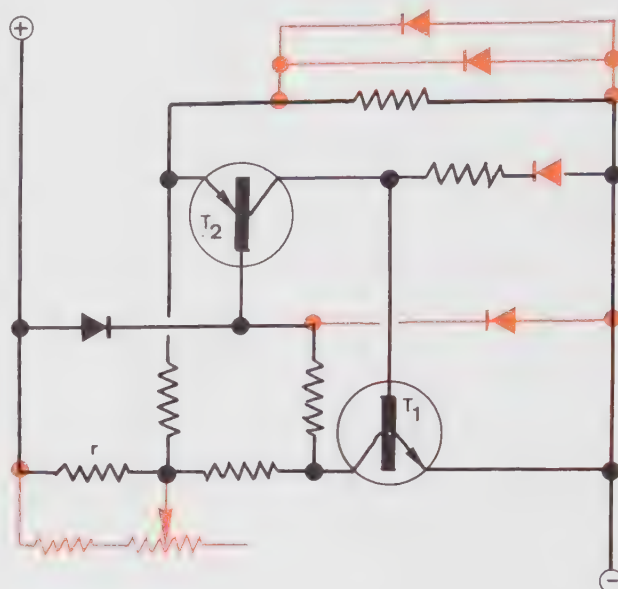


Figure 16

Le montage doit aussi tenir compte de l'influence néfaste de la température, en particulier sur la tension base-émetteur. Pour réduire le coefficient de température du courant, l'étage amplificateur T_1 est réalisé au moyen d'un transistor au silicium.

Le courant de sortie, dont l'intensité peut être ajustée entre 200 et 400 micro-ampères, est réglé au moyen d'un potentiomètre.

Le microjet étant parcouru par le courant d'intensité 280 micro-ampères fourni par ce générateur, nous pouvons nous assurer que la puissance dissipée par effet Joule est négligeable et n'a aucune influence sur la composition chimique du microjet. Si l'on suppose que ce dernier présente sa résistance optimale calculée précédemment, la puissance maximale dissipée est de 17 milliwatts, valeur totalement négligeable, d'autant plus qu'il s'agit de matière renouvelée.

III.3.2. Amplificateur et Discriminateur

La différence de potentiel qui apparaît aux bornes du microjet est appliquée à un amplificateur dont l'impédance d'entrée et le gain en courant sont

élevés, et dont la bande passante est suffisante pour admettre la gamme des fréquences des fluctuations de la surface libre. On peut fixer une limite supérieure à cette gamme de fréquences en choisissant la valeur maximale de la vitesse moyenne $\bar{U}$ de l'écoulement et en prenant en compte la dimension longitudinale minimale d'une fluctuation antérieurement arrêtée. Nous nous sommes imposé les valeurs $\bar{U}_{\max} = 40 \text{ m/s}$ et $\delta x_{\min} = 0,5 \text{ mm}$. (Figure 17). Si l'on considère, en première approximation, que l'évolution dans le temps d'un point de la surface libre est

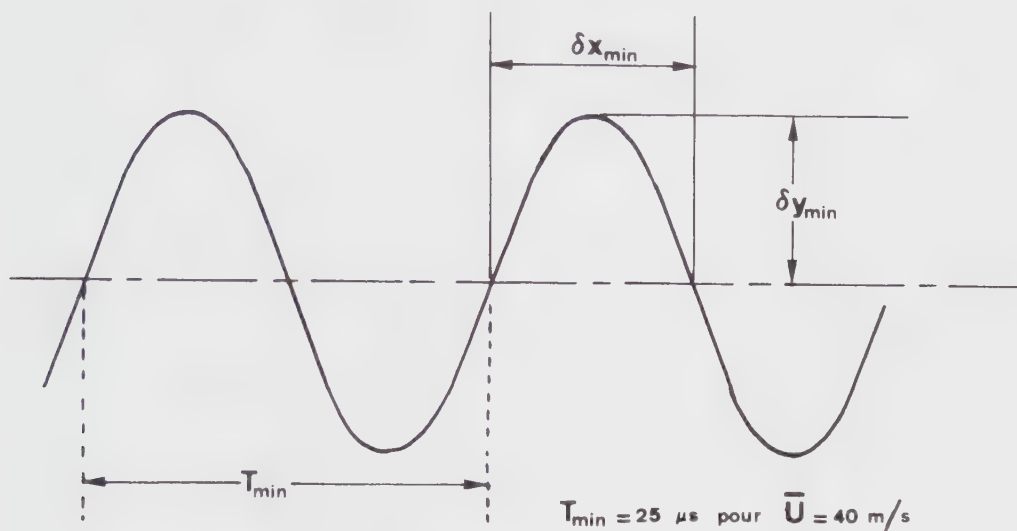


Figure 17

sinusoïdale, la fréquence maximale des fluctuations est de 40 kilohertz.

L'ensemble du circuit Amplificateur-Discriminateur est schématisé sur la figure 18.

Les impulsions parasites dues aux ruptures momentanées de la conduction électrique du microjet (cf. II.4) ne doivent pas être prises en considération lors de la mesure des valeurs moyenne ou quadratique moyenne du signal. Le circuit discriminateur élimine l'influence de ces impulsions en ramenant l'amplitude du signal, pendant la durée de chacune de ces impulsions, à la valeur moyenne obtenue continuellement. Pour cela, des impulsions rectangulaires engendrées par un comparateur, en coïncidence avec les impulsions parasites, commandent la fermeture et l'ouverture d'un interrupteur électronique qui reçoit le signal issu de l'amplificateur. En position "fermé", cet interrupteur laisse passer le signal qui lui est appliqué ; en position "ouvert" le niveau de sortie est égal au niveau moyen du signal antérieurement injecté à l'entrée. Les figures 19 et 20 donnent une information globale des traitements subis par le signal d'entrée, pour que le signal

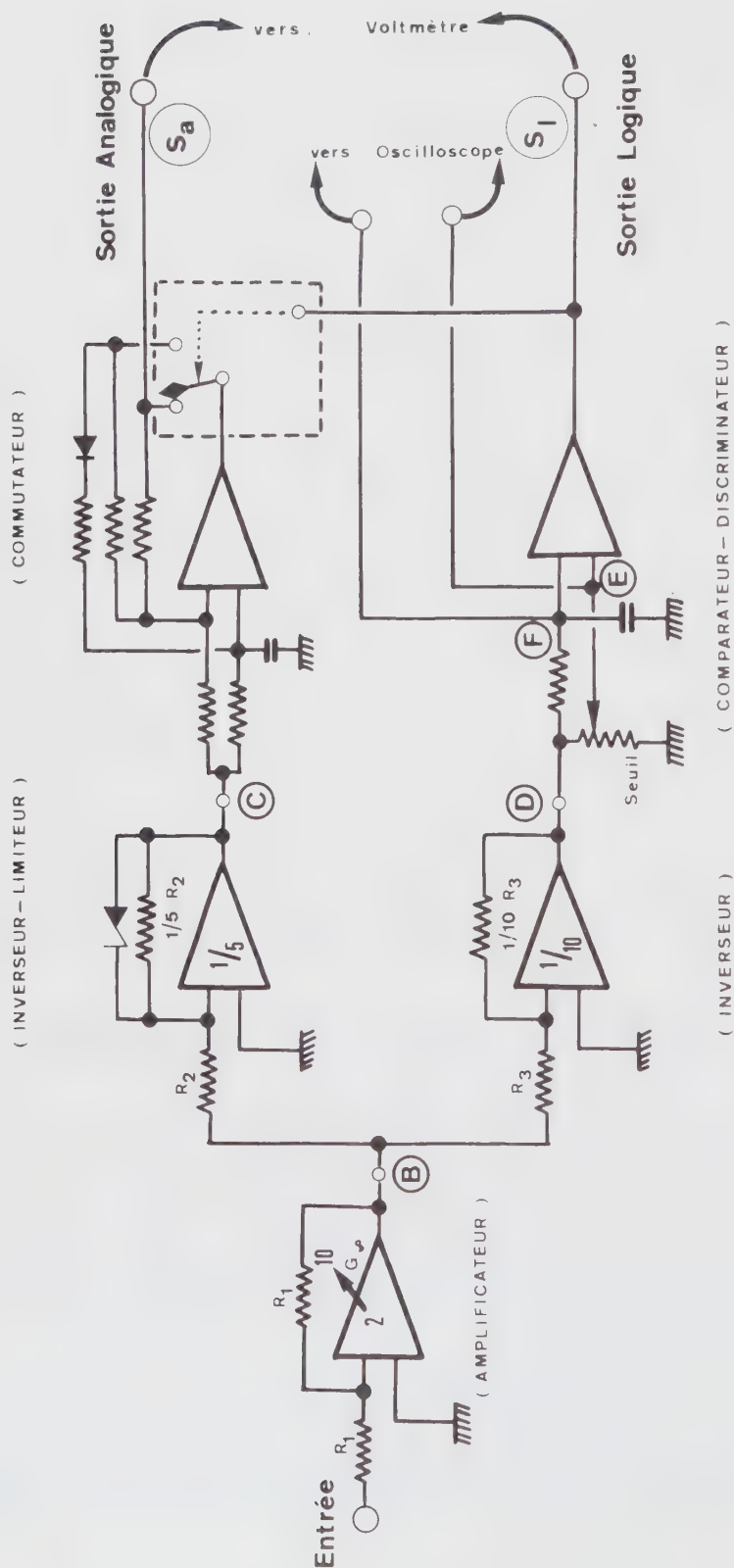


Figure 18 : Schéma de principe du Fluctuomètre

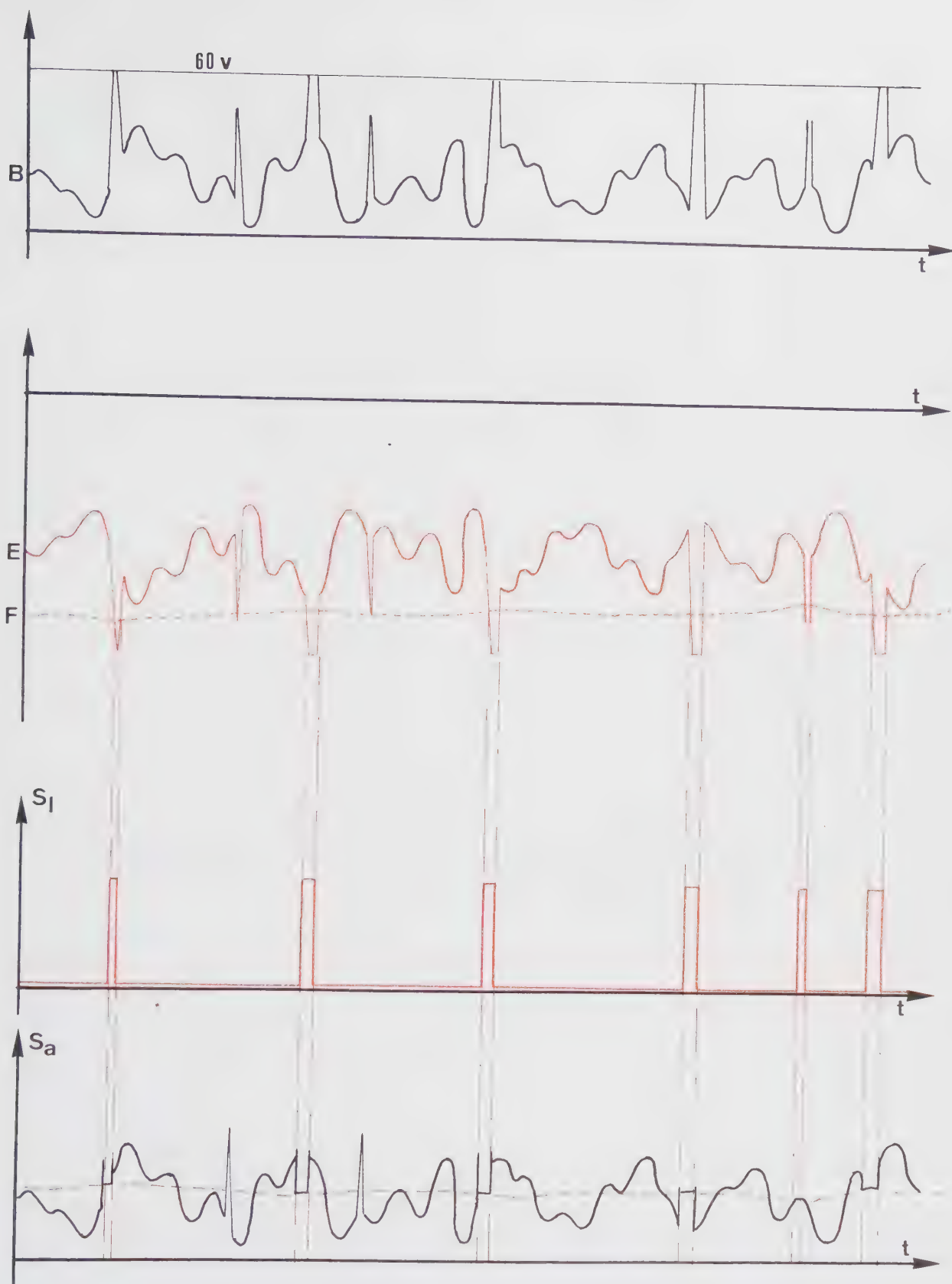


Figure 19: *Traitement du signal fourni par le microjet*

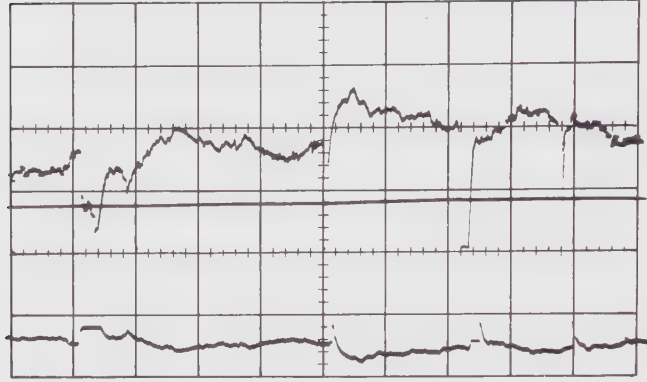


Figure 20 : *Enregistrement oscillographique
des signaux électriques*

★ ★

de sortie soit statistiquement une représentation la plus exacte possible de l'état de la surface libre.

Le circuit est constitué de quatre éléments fonctionnels que nous examinons successivement.

- Amplificateur (Figure 21).

L'étage d'entrée de l'amplificateur de détection est constitué d'un transistor double, type 2 N 2640, dont les émetteurs sont alimentés conjointement par un module à intensité constante ; un tel montage assure la constance du courant total absorbé, la linéarité, et évite les trop grandes dérives en température. Cet étage d'entrée est suivi d'un circuit Darlington composé de deux transistors collecteur commun mis en série et alimentés en courant d'intensité constante ; on a choisi ce circuit en vue d'obtenir une charge, donc une dérive, du premier étage faible. Le gain en tension, continu et alternatif, de l'amplificateur est égal à l'unité (position "1" de l'inverseur). Pour accroître, si nécessaire, le gain alternatif, un circuit du type intégrateur de Miller est inséré dans la boucle de contre-réaction alternative ; ce circuit a l'avantage de garder un gain constant jusqu'aux très basses fréquences. Un potentiomètre permet de régler le gain alternatif à une valeur quelconque, comprise entre 2 et 10 (position "Var" de l'inverseur).

La tension de décalage d'entrée (valeur de la tension de sortie pour une tension d'entrée nulle) est de l'ordre de 300 micro-volts. La réponse en fréquence est linéaire à 3 décibels jusqu'à 500 Kiloherztz ; cette grande fréquence de coupure garantit un temps de réponse apte à faciliter la parfaite transmission d'éventuelles variations brusques de la surface libre.

- Inverseurs-Limiteurs.

Le signal issu de l'amplificateur de détection (point test B) est injecté simultanément à deux amplificateurs inverseurs, l'un de gain 0,2 , l'autre de gain 0,1. Le niveau de sortie du premier est limité à 10 volts par des diodes Zener (Figure 22). Ces deux étages sont conçus à partir d'un amplificateur intégré double type MC 1437 L.

- Comparateur-Discriminateur.

Un comparateur, circuit intégré LM 311, reçoit sur son entrée négative une fraction réglable du signal issu du deuxième amplificateur-inverseur, et sur son entrée positive la valeur moyenne du même signal, intégré par un réseau intégrateur à grande constante de temps (240 millisecondes). Le signal de sortie, signal logique S₁ , est une suite d'impulsions rectangulaires d'amplitude 5 volts, en coïncidence avec les impulsions parasites du signal d'entrée.

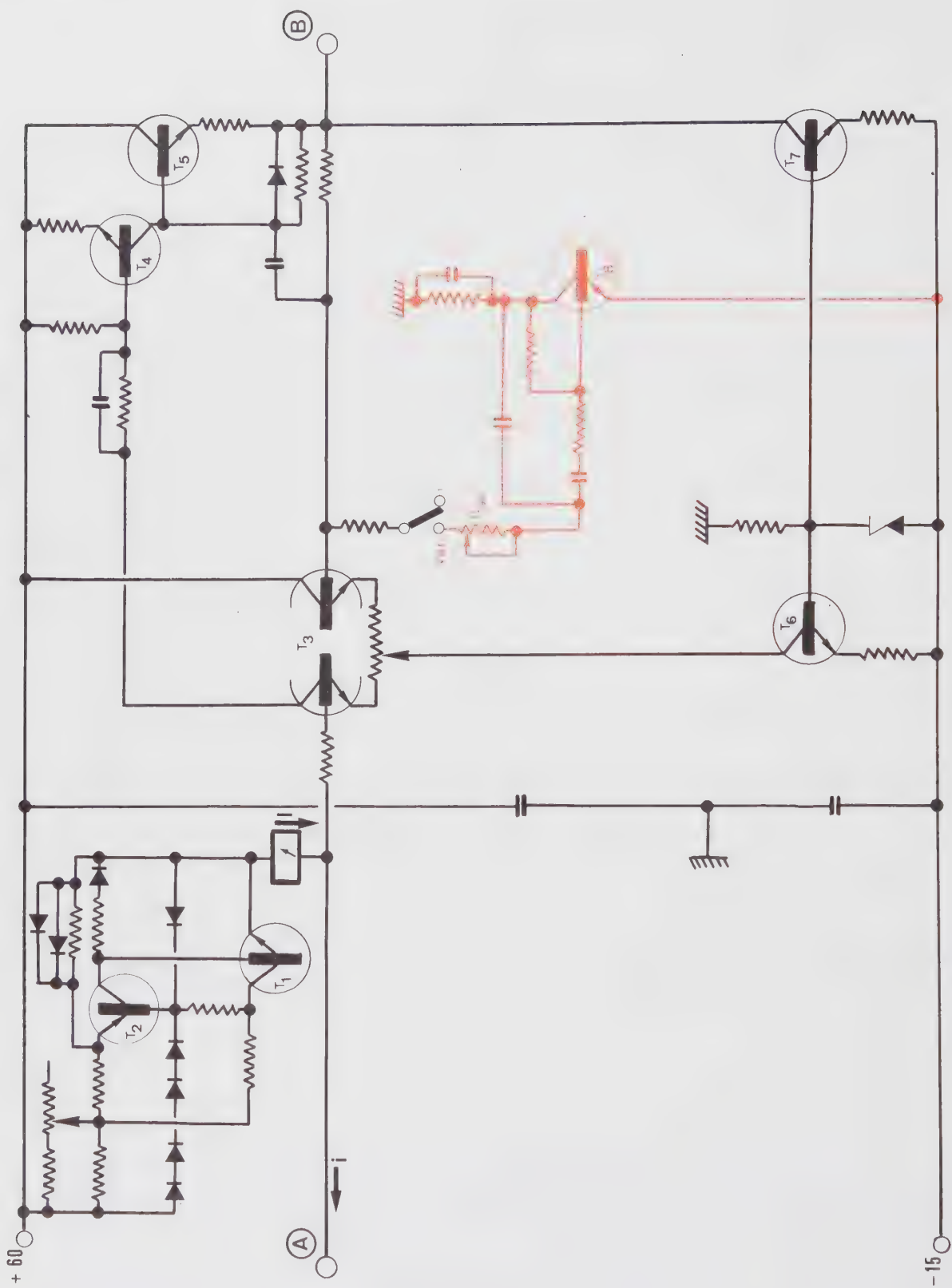


Figure 21 : Amplificateur de détection

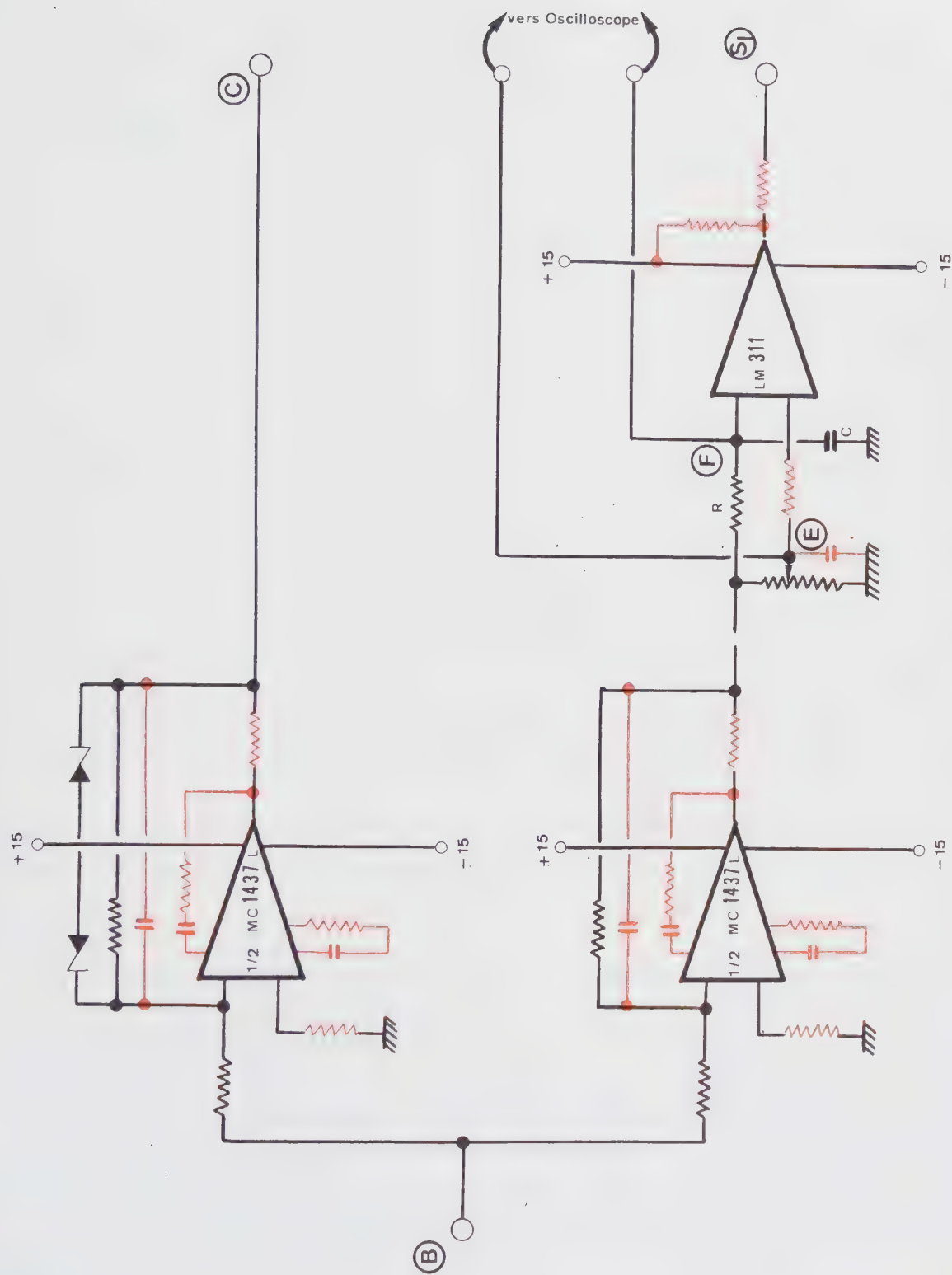


Figure 22 : *Inverseurs et Discriminateurs*

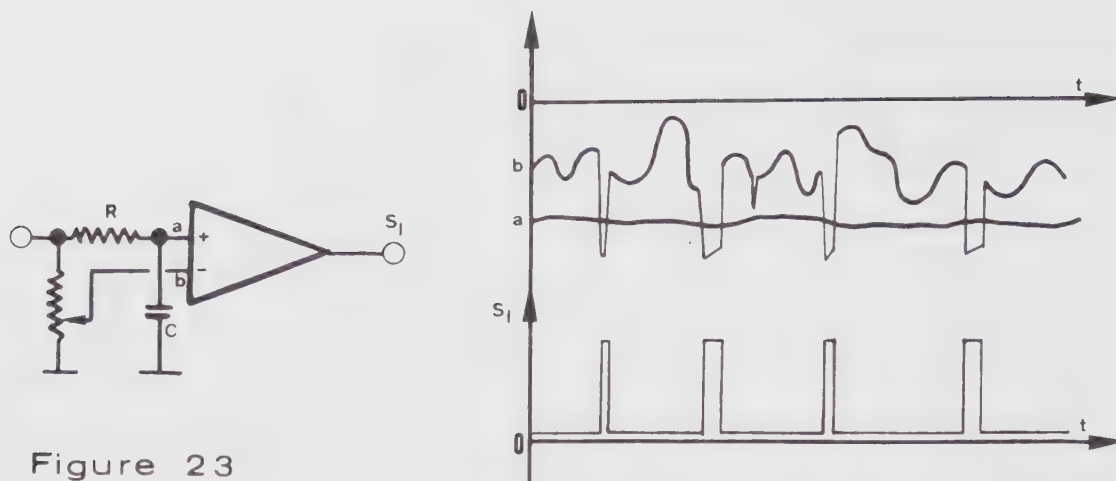


Figure 23

-Commutateur Analogique.

Un amplificateur intégré SN 72709 N recueille sur son entrée négative le signal analogique en provenance de l'inverseur-limiteur. L'entrée positive est attaquée par ce même signal intégré par un réseau dont la constante de temps est de 470 millisecondes. Un circuit de commutation à transistors est incorporé dans la boucle de contre-réaction (Figures 24 et 25) ; commandé par les impulsions S_1 engendrées par le comparateur, il commute la sortie vers deux circuits de contre-réaction, l'un d'entre eux fournissant le signal de sortie analogique. Celui-là est donc identique au signal d'entrée sauf en présence d'une impulsion : pendant la durée de cette impulsion le niveau de sortie est égal au niveau moyen délivré par le circuit intégrateur de l'entrée positive.

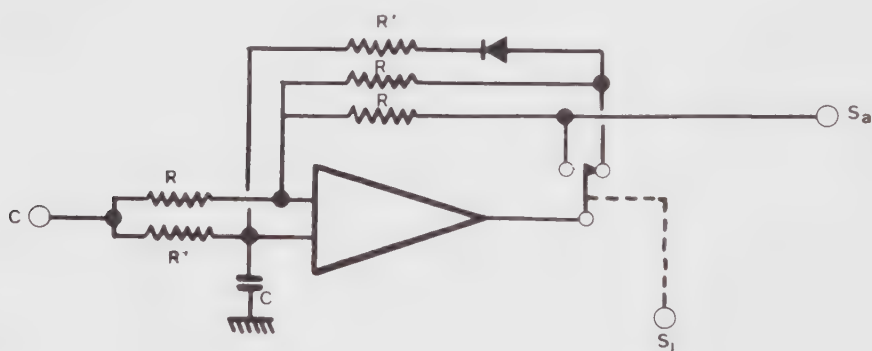


Figure 24

tive est attaquée par ce même signal intégré par un réseau dont la constante de temps est de 470 millisecondes. Un circuit de commutation à transistors est incorporé dans la boucle de contre-réaction (Figures 24 et 25) ; commandé par les impulsions S_1 engendrées par le comparateur, il commute la sortie vers deux circuits de contre-réaction, l'un d'entre eux fournissant le signal de sortie analogique. Celui-là est donc identique au signal d'entrée sauf en présence d'une impulsion : pendant la durée de cette impulsion le niveau de sortie est égal au niveau moyen délivré par le circuit intégrateur de l'entrée positive.

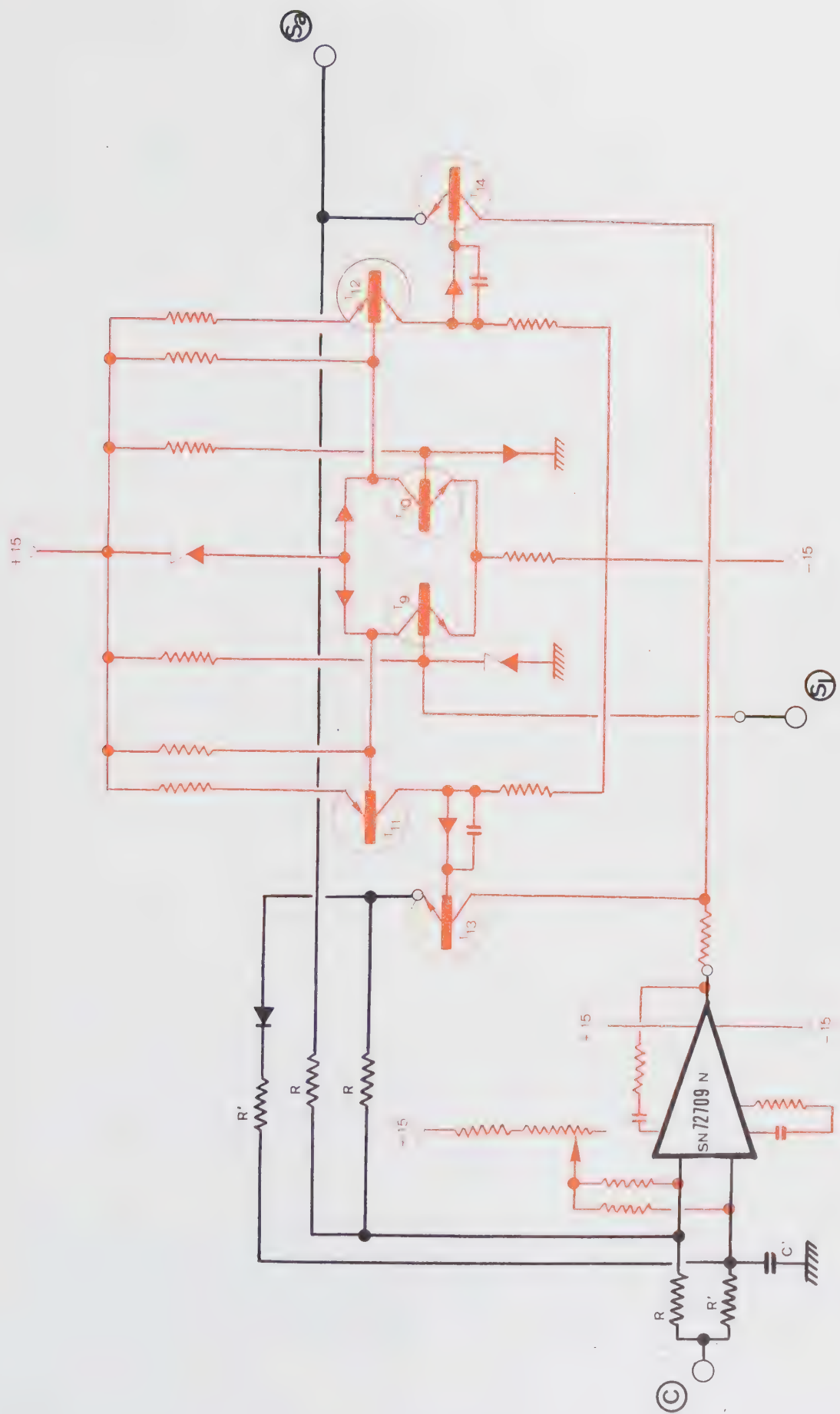


Figure 25: *Commutateur analogique*

III.3.3. Résistivimètre

La mesure de la résistivité du fluide composant le microjet est effectuée in-situ par l'intermédiaire d'une sonde à circulation. Le débit dans cette sonde étant faible (de l'ordre de $0,25 \text{ cm}^3/\text{s}$), le dispositif de mesure peut être perturbé par une éventuelle polarisation des électrodes ; pour l'éviter, nous avons choisi un dispositif qui fonctionne sur le principe de la conversion résistance-fréquence.

Un réseau résistance-capacité $R - C$, dont la résistance R est celle de la colonne liquide contenue dans la sonde, pilote la fréquence d'un oscillateur. La valeur du condensateur C étant fixe, la période du signal produit par cet oscillateur est directement proportionnelle à la valeur de la résistance R . L'étalonnage préalable avec une solution type permet d'ajuster la valeur de C de manière que la mesure de la période de l'oscillation conduise à l'affichage direct de la résistivité de la solution.

- Sonde de conductivité

La sonde de conductivité est placée dans la conduite d'alimentation hydraulique du micro-injecteur, immédiatement en amont de celui-là. Son diamètre intérieur est le même que celui de la conduite ($\varnothing 1,2 \text{ mm}$). Elle est constituée de trois anneaux en acier inoxydable séparés par deux tubes de verre identiques ; les deux anneaux extrêmes sont électriquement liés (Figure 26). La résistance de cette sonde emplie de liquide est égale à celle obtenue par la mise en parallèle des deux résistances constituées par les colonnes liquides contenues dans les deux tubes de verre. Cette sonde est particulièrement adaptée à la mesure des fortes conductivités de liquides en circulation à faible débit.

- Oscillateur

Le résistivimètre proprement dit est en fait un oscillateur à contre-réaction positive (Figure 27). Il est constitué par deux amplificateurs dont le premier est utilisé en comparateur. La tension exponentielle obtenue aux bornes du réseau $R-C$ (entrée 3) est comparée à un seuil de niveau égal au tiers de la valeur de la tension appliquée au réseau. Le basculement s'effectue chaque fois que les deux niveaux sont en coïncidence et l'oscillateur délivre des impulsions rectangulaires dont la période est proportionnelle au produit $R.C$, donc à R .

- Périmètre (Figure 29)

La période du signal de l'oscillateur est mesurée en comptant, durant un temps qui lui est directement proportionnel, des impulsions de fréquence fixe formées par un générateur. La période de ces impulsions est donnée par la relation :

$$T = 2R_1 C_1 \text{ Log } \frac{e_0 + e_i}{2 e_i}$$

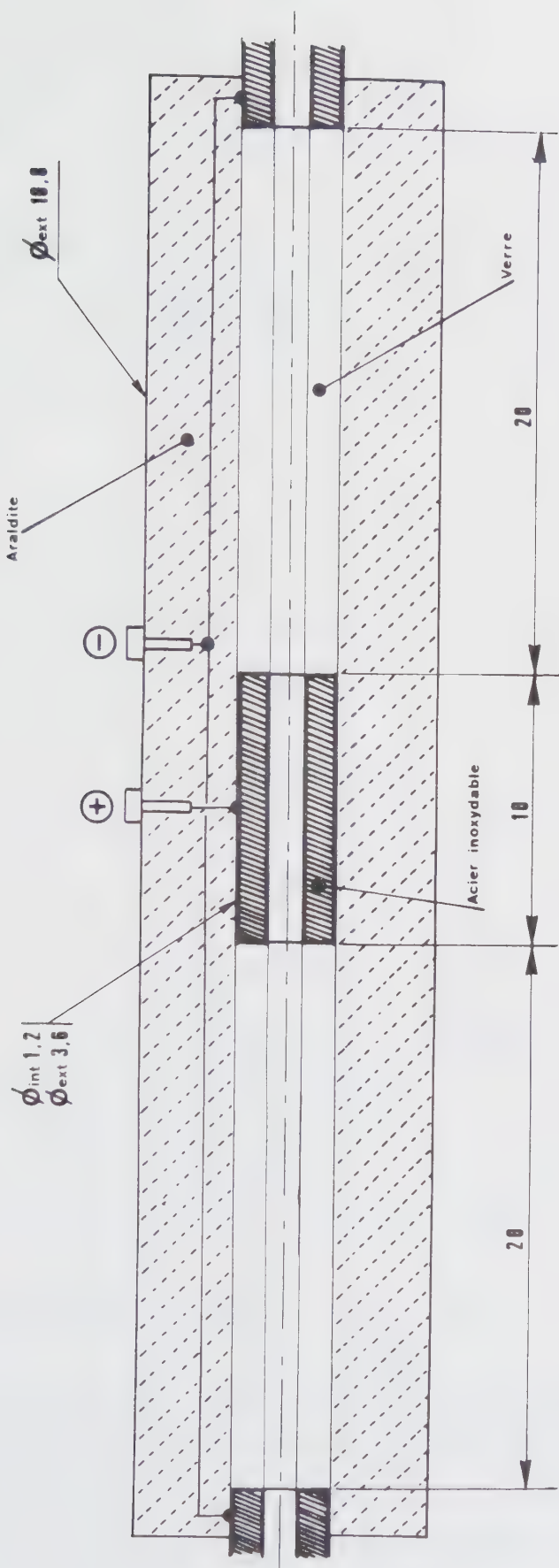
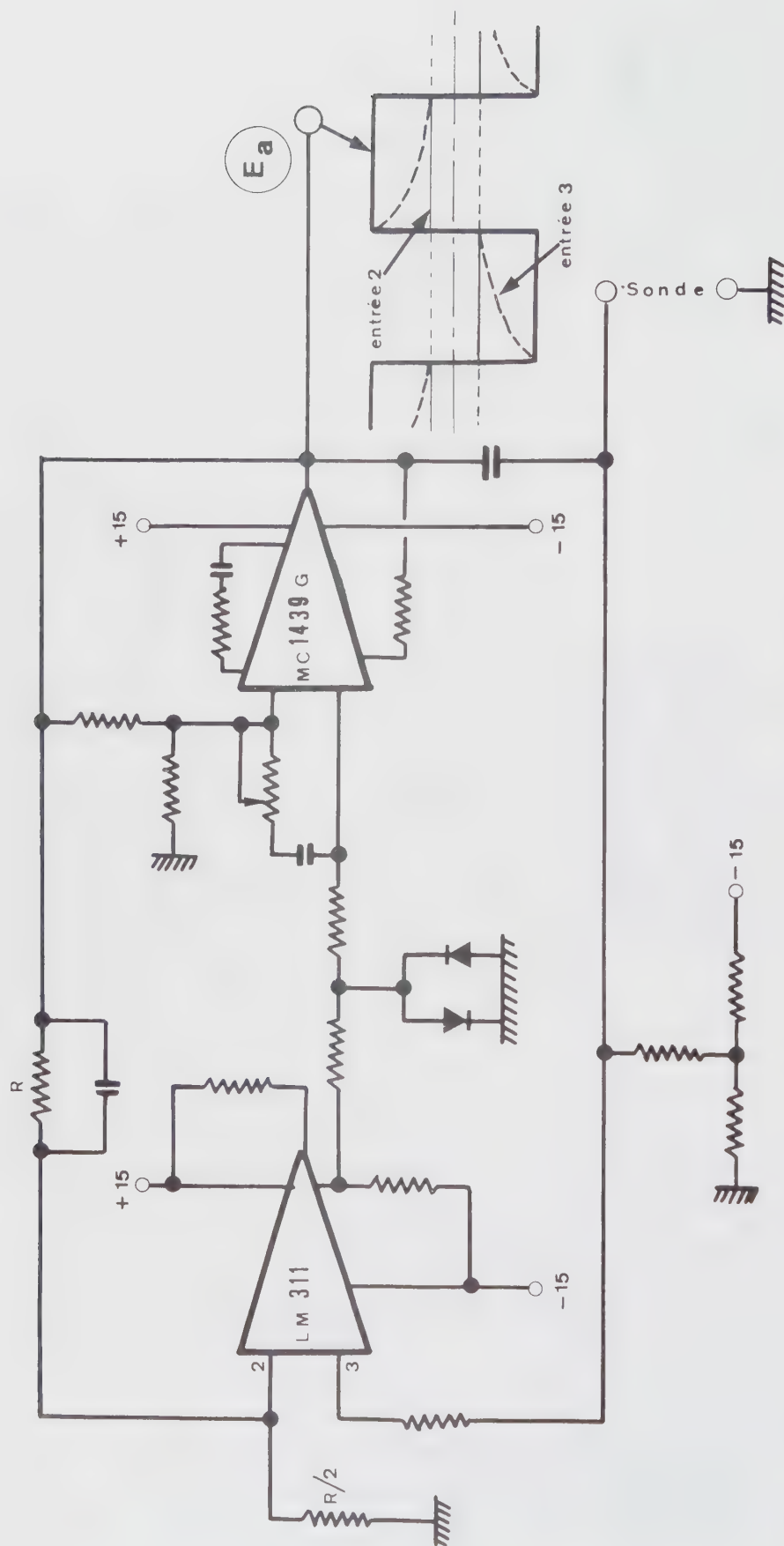


Figure 26 : Sonde de conductivité



50

Figure 27 : Résistivimètre

dans laquelle

$$e_i = e_o \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

La stabilité de ce circuit amplificateur travaillant en saturation, est essentiellement liée aux éléments passifs, notamment au condensateur C_1 . (Figure 28)

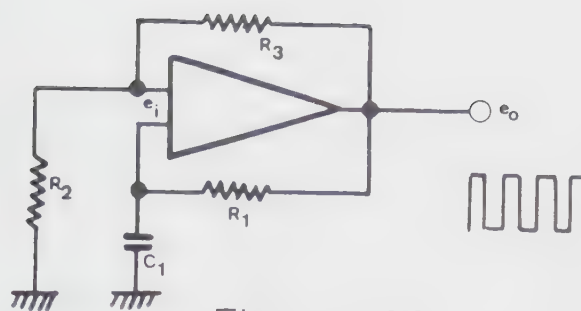


Figure 28

Les impulsions de sortie ne sont dirigées vers le compteur que pendant un temps déterminé par la durée des signaux issus de l'oscillateur.

Un circuit annexe effectue la remise à zéro automatique du compteur après chaque mesure. Le taux de répétition est réglé au moyen d'un potentiomètre placé dans le circuit d'une bascule monostable SN 74121.

- Compteur.

L'affichage numérique de la valeur de la résistivité est effectué par des décades totalisatrices (Figure 30). Comme nous l'avons indiqué précédemment, la valeur de la résistivité est affichée directement en ohms. centimètre avec une sensibilité de 10^{-3} ohm. cm et une précision de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ ohm.cm.

III.3.4. Réalisation pratique

L'ensemble du système de traitement est présenté dans un coffret aux normes 19", de trois unités de hauteur. Il est appelé Fluctuomètre type FM 011. Les circuits électroniques sont du type hybride, comprenant, outre des éléments passifs, des transistors et des modules intégrés. Les éléments de réglage indispensables à l'utilisateur, ainsi que les indicateurs (intensité du courant de microjet, résistivité) sont regroupés par fonction sur la face avant. (Figure 31)

III.4. Système de mesure

Le système de mesure que nous présentons ici, sous le nom de Voltmètre Intégrateur Quadratique FM 012, [20] a pour rôle essentiel la mesure des valeurs moyenne et quadratique moyenne de signaux aléatoires, tels ceux, issus du Fluctuomètre, qui représentent l'évolution dans le temps d'un point d'une surface libre.

Cet appareillage s'étant révélé un instrument de travail particuliè-

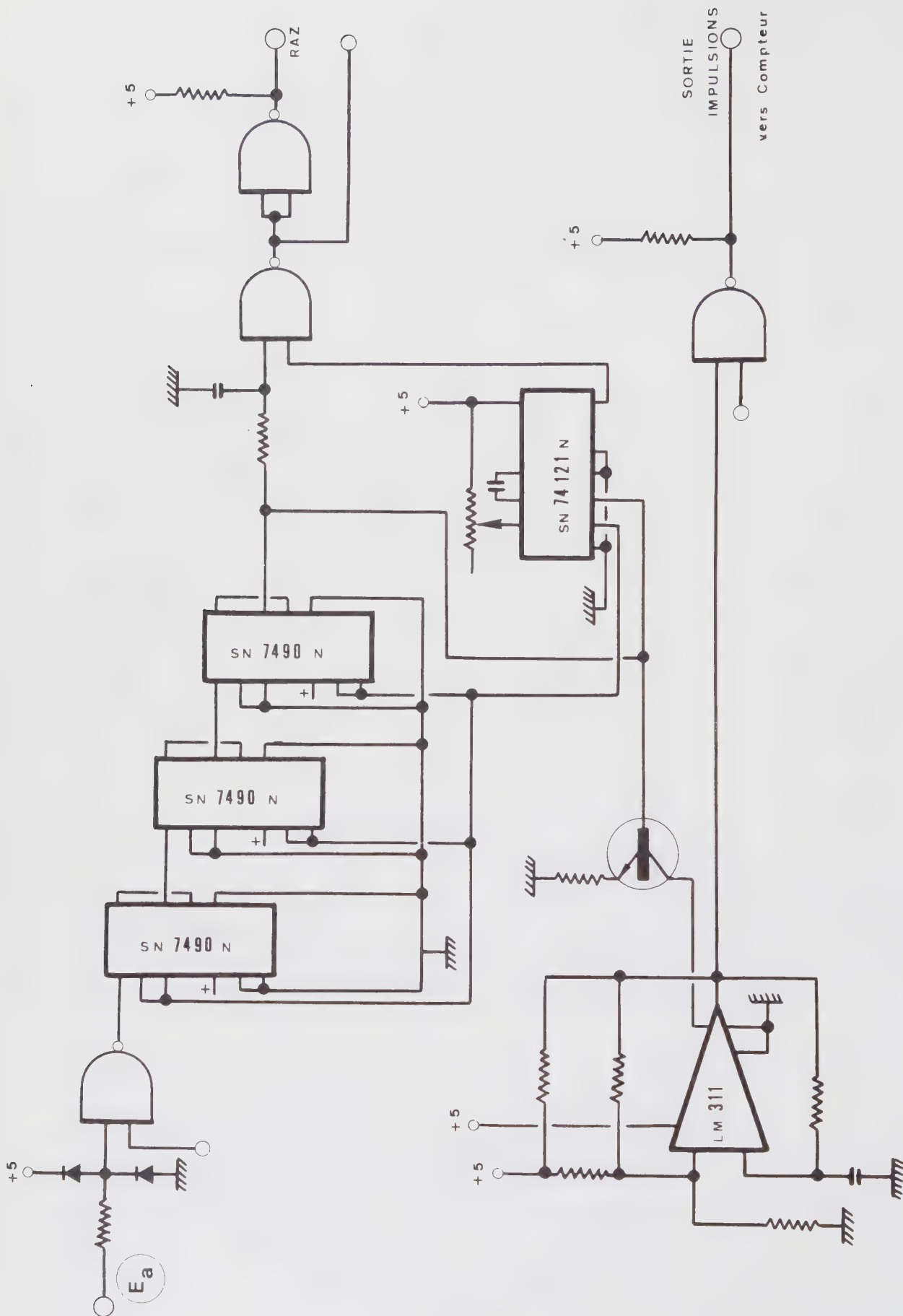


Figure 29: Périodemètre

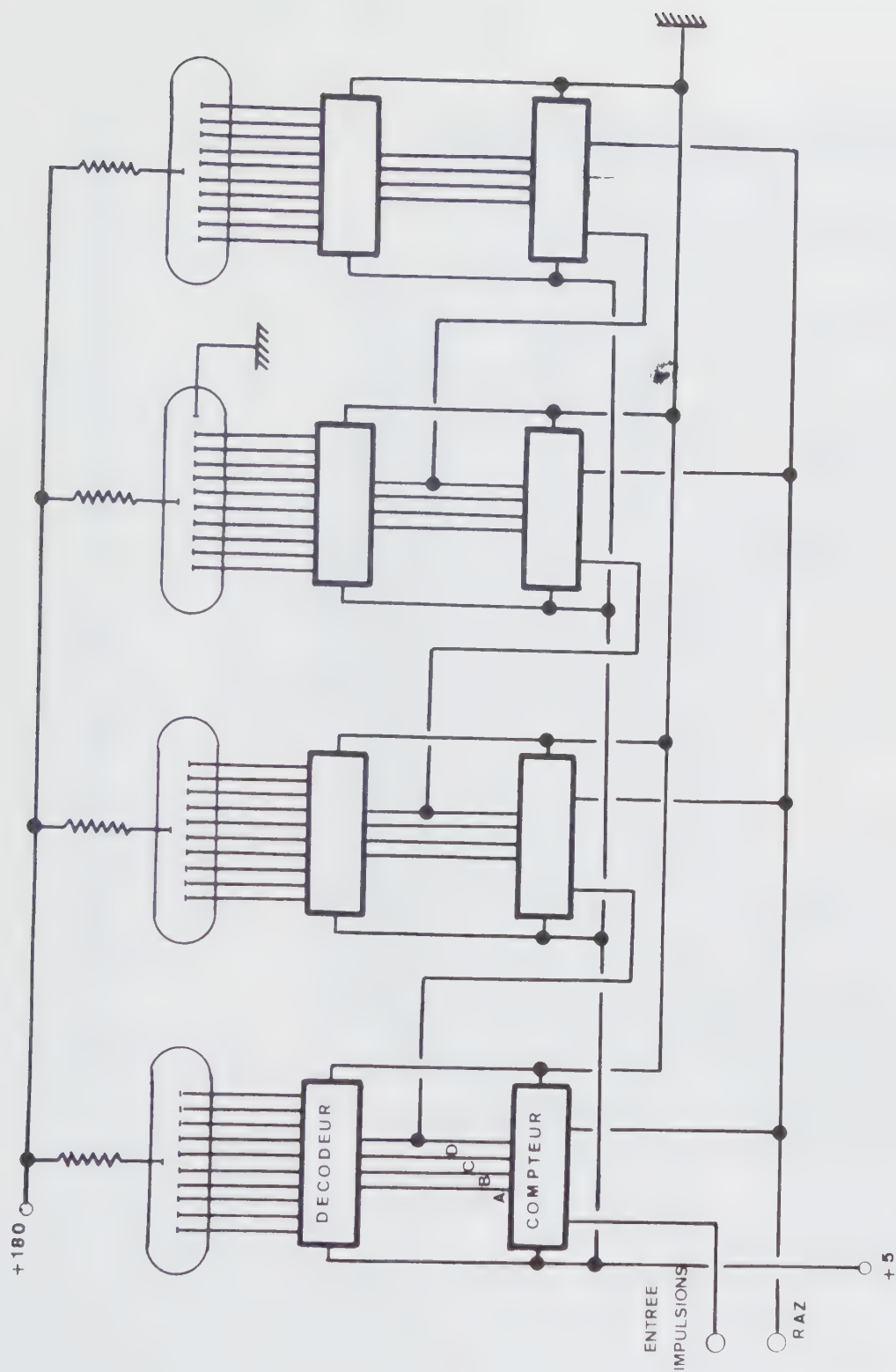


Figure 30 : Affichage numérique

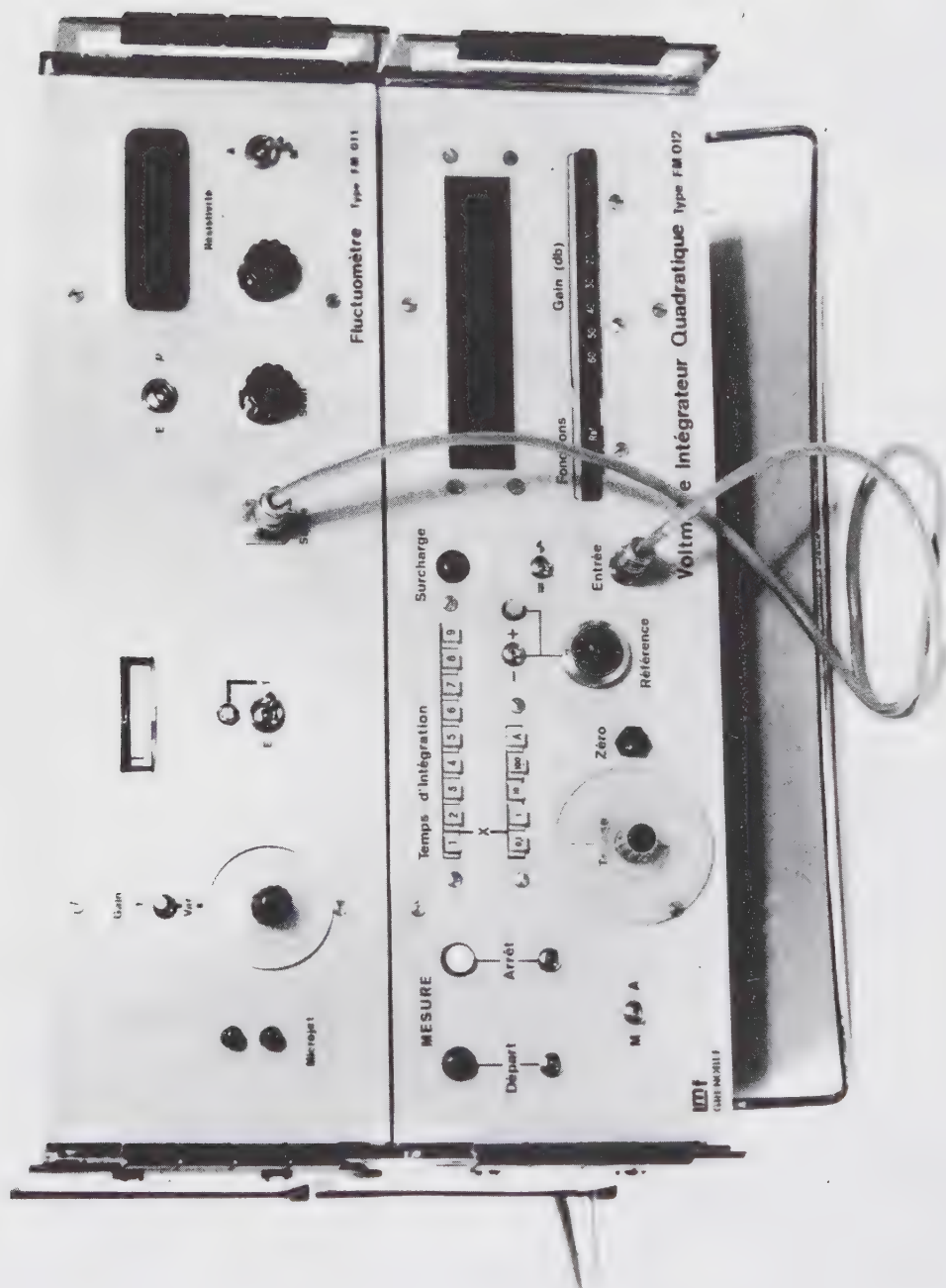


Figure 31 : *Fluctuomètre et Voltmètre Intégrateur*

rement efficace dans toutes les études de phénomènes aléatoires, notamment des phénomènes turbulents, nous examinerons en détail la manière avec laquelle il a été réalisé, après avoir recherché les caractéristiques qui lui étaient nécessaires.

III.4.1. Principes fondamentaux

Quelques notions élémentaires sur les mesures de phénomènes aléatoires permettent de définir les paramètres qui déterminent les performances qu'un appareil précis doit offrir.

Les estimations de la valeur moyenne et de la valeur quadratique moyenne d'un signal aléatoire stationnaire et ergodique représentent deux informations statistiques essentielles, à partir desquelles on peut déduire des enseignements pratiques.

- Valeurs moyennes : la moyenne $\bar{e}$ d'un signal $e(t)$ est définie par

$$\bar{e} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e(t) dt$$

où τ est le temps d'intégration. Lorsque ce signal est étudié au moyen d'un dispositif à liaisons capacitives qui supprime la composante continue, $\bar{e}$ est nul. La variance de ce signal est définie par $\sigma = \overline{(e - \bar{e})^2}$. La racine carrée de la variance, ou écart quadratique moyen, donne une information précise sur l'amplitude des fluctuations de $e(t)$, ou aussi sur l'étalement des fonctions de distribution autour de la valeur moyenne. La mesure de la variance donne une information relative à l'énergie moyenne du signal. Pour déterminer les paramètres statistiques du signal aléatoire, il est donc essentiel de pouvoir mesurer des carrés moyens. La détermination de la valeur quadratique moyenne e_q , définie par

$$e_q = \sqrt{\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [e(t)]^2 dt}$$

où τ est le temps d'intégration, permet une première analyse du signal.

- Mesure de la valeur quadratique moyenne : la mesure directe de e_q au moyen de voltmètres électroniques est affectée par plusieurs facteurs dont l'influence sur la précision est importante. Les voltmètres habituels à courant alternatif détectent le signal à l'aide d'un détecteur de valeur moyenne et affichent le résultat sur l'échelle d'un galvanomètre (ou sur des décades numériques) préalablement étalonné en valeurs efficaces au moyen d'une onde sinusoïdale. Cet étalonnage est rendu possible par le fait qu'il existe un rapport constant entre la valeur efficace et la valeur moyenne d'une sinusoïde pure redressée. On ne peut déjà plus utiliser cette propriété sans commettre d'erreur lorsqu'il s'agit d'une onde péri-

dique, surtout lorsqu'il y a prédominance d'harmoniques impairs ; l'erreur est encore plus notable dans le cas d'un signal aléatoire.

"Bande passante" : il est nécessaire que la bande passante de l'appareil de mesure soit très étendue. En effet, l'énergie moyenne d'un signal étant fonction de sa largeur de bande, la valeur quadratique moyenne est fonction de la racine carrée de cette largeur de bande. En outre, les très basses fréquences ont une contribution très importante dans certains types de phénomènes aléatoires, notamment dans les écoulements liquides turbulents. Malgré les avantages de stabilité et de sûreté des circuits à courant alternatif, il est préférable d'utiliser des circuits à courant continu afin d'accroître les possibilités de l'instrument.

"Facteur de crête" : la plupart des phénomènes aléatoires contiennent des pointes occasionnelles de grande amplitude et de courte durée ; pour que l'appareil de mesure indique l'énergie moyenne avec grande précision, il doit admettre ces pointes sans surcharge ni écrêtage. Une valeur communément utilisée pour caractériser un signal contenant de telles pointes est son facteur de crête, défini comme le rapport optimal de la valeur de crête à la valeur quadratique moyenne d'un signal mesuré sans déformation. Dans la majorité des cas, on admet qu'au delà d'un facteur de crête de 7, l'erreur est négligeable en regard des autres erreurs introduites par les circuits électroniques.

"Temps d'intégration" : le temps pendant lequel est effectuée une moyenne, ou temps d'intégration, est un facteur important dans la mesure de signaux à très basse fréquence. Pour un signal non périodique, il est intéressant de pouvoir choisir le temps d'intégration en fonction de la limite inférieure du spectre de fréquence ; si la densité spectrale n'est pas constante mais fonction de la fréquence, des temps d'intégration différents pourront être nécessaires. Lié au temps d'intégration, le mode d'affichage du résultat est un facteur non négligeable. Celui-là est souvent un affichage analogique : une tension se mesure par la déviation d'une aiguille et nécessite une interpolation visuelle pour chiffrer la position vraie ; la précision est limitée. En outre, la superposition de multiples fréquences crée un mouvement de l'aiguille d'une telle complexité que la détermination d'une moyenne devient très difficile, voire impossible. Si l'on veut admettre des signaux à très basse fréquence, la très grande valeur de la constante de temps utile entraîne une lecture fastidieuse. Tant du point de vue de la mesure elle-même, de la gamme d'utilisation que de la facilité de lecture, il est indispensable d'effectuer une intégration réelle et d'avoir recours à un affichage numérique qui élimine toute interpolation ; la lecture est alors précise et rapide.

III.4.2. Fonctionnement_général

Le schéma synoptique de la figure 32 décrit succinctement le principe général de fonctionnement.

L'entrée analogique comporte deux éléments successifs. Le premier, nécessaire dans un système quadratique où les valeurs élevées ont un poids prédominant, permet une mise à l'échelle telle que le niveau maximal admissible soit presque atteint : c'est l'atténuateur-amplificateur d'entrée avec visualisation de surcharge. Le second est un détecteur linéaire double alternance traduisant les tensions négatives d'entrée en tensions positives de même valeur absolue ; étant donnée l'influence des valeurs faibles, la précision au voisinage du zéro est particulièrement soignée. Le redresseur alimente, éventuellement, le circuit d'élévation au carré, puis attaque un convertisseur analogique-digital. Une horloge fixe la durée des prélèvements et peut être réglée dans une gamme étendue de valeurs. La sommation se fait dans un compteur d'impulsions, afficheur décimal. Après étalonnage, la valeur affichée est directement en volts (ou en volts carrés). Une sortie en code binaire décimal permet l'enregistrement sur imprimante, ou sur perforatrice, des mesures cycliques successives. Les caractéristiques spécifiques de cet appareil sont :

- Modes de fonctionnement : valeur "module moyen", valeur moyenne, valeur quadratique moyenne, rapport de temps.
- Temps d'intégration : réglable de 0,1 à 900 secondes
- Gammes d'entrée : de 0 à 100 volts, en 9 gammes
- Résolution : 10 microvolts
- Dynamique : facteur de crête de 15
- Bande passante : du continu à 100 kilohertz
- Précision : $\pm 0,5\%$, y compris l'incertitude sur le dernier chiffre.

III.4.3. Circuits_électroniques

- Amplificateur-Atténuateur d'entrée :

Il s'agit d'un amplificateur opérationnel (BURR-BROWN, type 3011/25), module époxy, stabilisé par un chopper à transistor à effet de champ commandé par un oscillateur à l'état solide interne. Ce mode de stabilisation garantit une dérive de tension d'entrée, une tension de décalage et un courant de polarisation extrêmement faibles. Une limitation du courant de sortie procure une défense efficace contre les court-circuits et les entrées sont protégées au delà de la valeur de la tension d'alimentation. Un réglage externe de zéro permet d'annuler la tension de décalage d'entrée, surtout lorsque l'amplificateur travaille à des niveaux

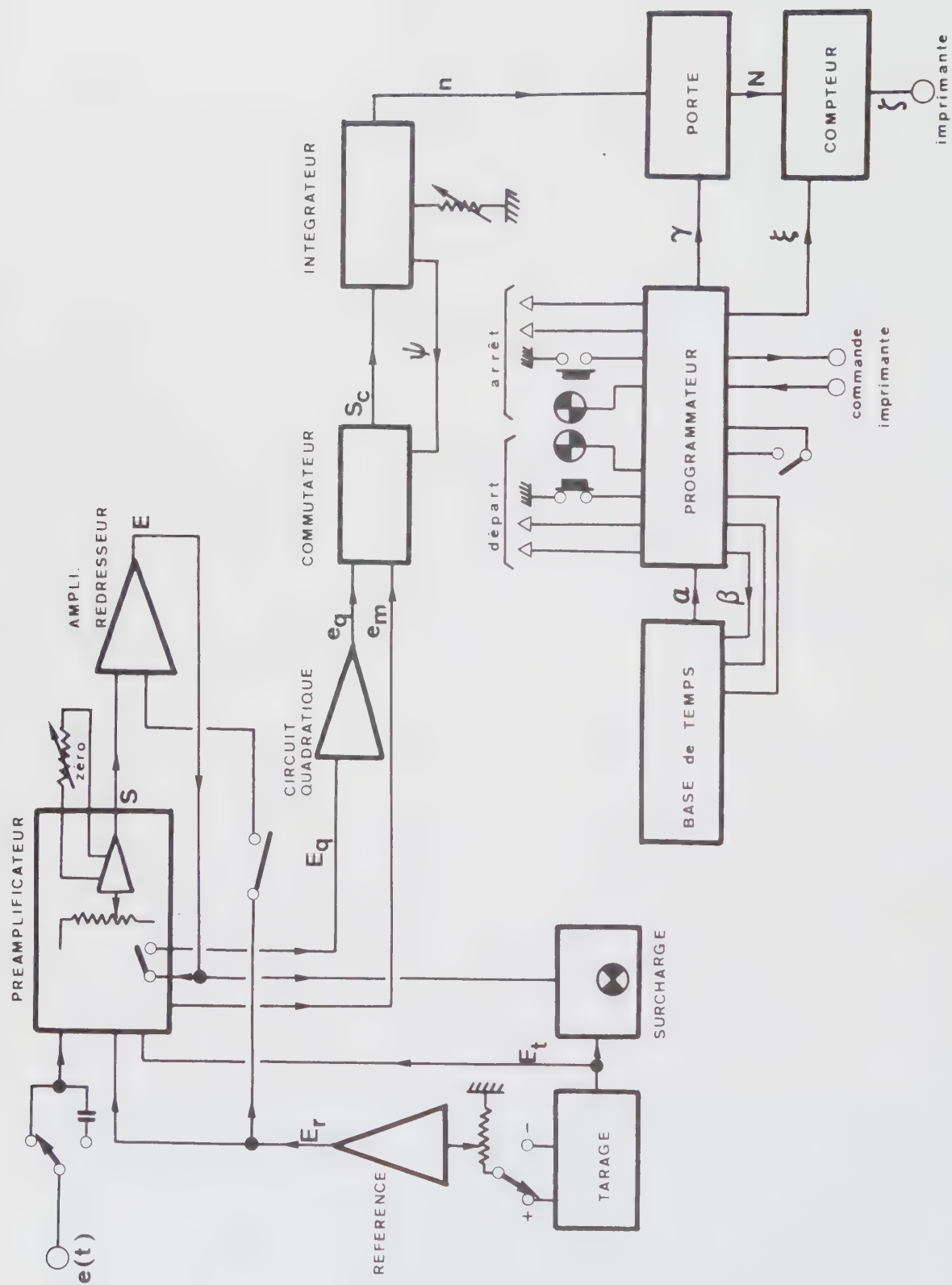


Figure 32 : *Synoptique du Voltmètre Intégrateur*

de gain élevés. Le principe du circuit est montré en figure 33. Le gain (ou l'at-

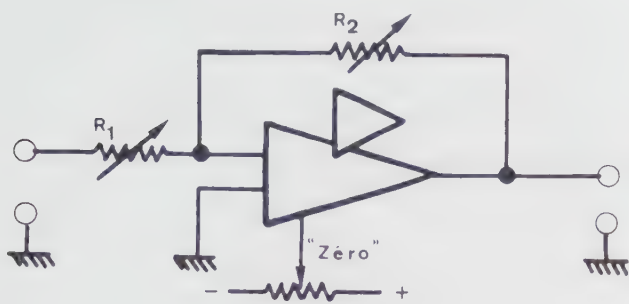


Figure 33

ténuation) est réglé au moyen d'un réseau résistif compensé $R_1 - R_2$ placé en contre-réaction.

Un circuit de surcharge avec visualisation optique permet d'ajuster ce gain de sorte que le signal d'entrée ne soit jamais écrêté. Le circuit complet de cet étage est présenté en Figure 34.

- Amplificateur-redresseur :

Cet élément effectue un redressement double alternance autour du zéro. Comme l'indique le schéma de principe de la figure 35, un amplificateur sommateur est utilisé en liaison avec un circuit redresseur simple alternance.

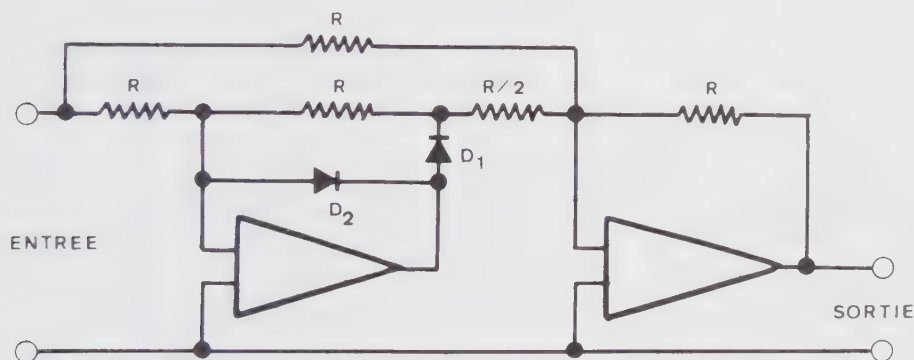


Figure 35

Les résistances des réseaux de contre-réaction doivent être ajustées de manière à assurer l'égalité des gains pour les signaux d'entrée positifs et négatifs. Le principe du circuit consiste à utiliser le gain élevé du premier amplificateur pour réduire les effets de saturation associés à une diode redresseuse. La résistance inverse et la chute de tension inverse de la diode D_1 sont divisées par le gain en boucle ouverte de l'amplificateur. Lorsque la sortie devient négative, D_1 se bloque rapidement et D_2 conduit afin de limiter la tension de sortie. On obtient ainsi un excellent redressement, avec une grande précision au voisinage du zéro.

Le circuit pratique, tel qu'il se présente en figure 37, utilise deux amplificateurs intégrés SN 72709 N.

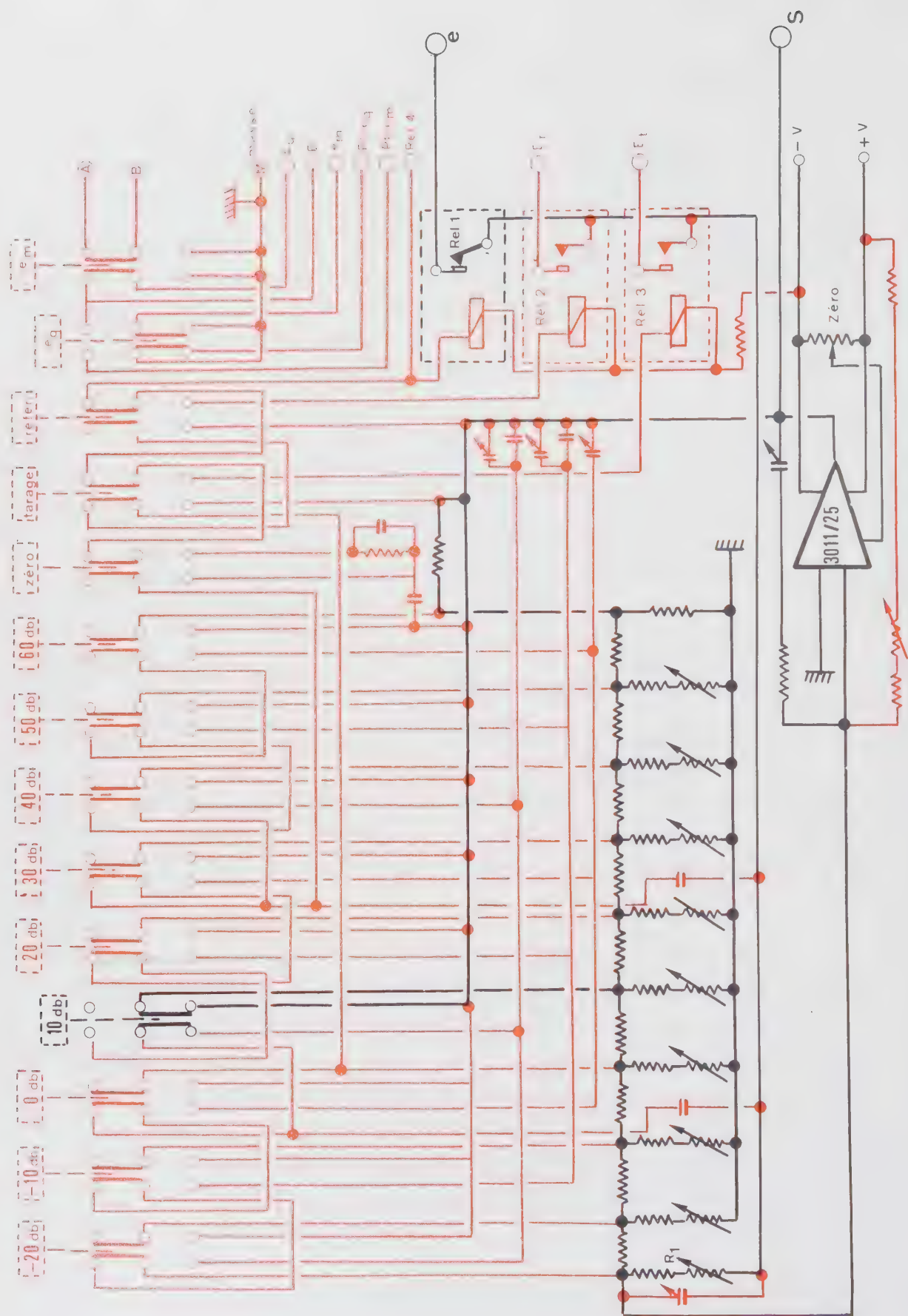


Figure 34 : Preamplificateur

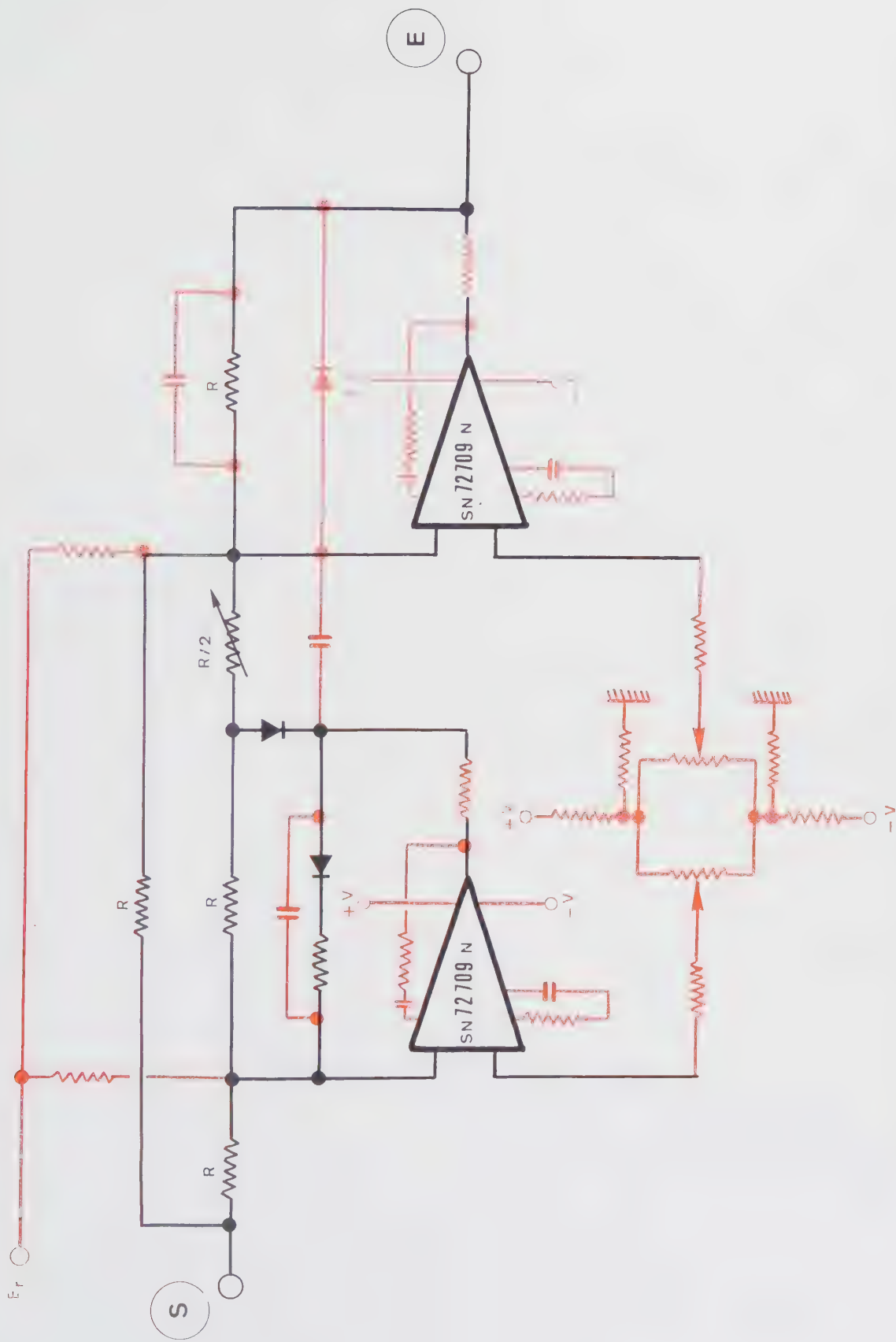


Figure 37 : *Amplificateur - redresseur*

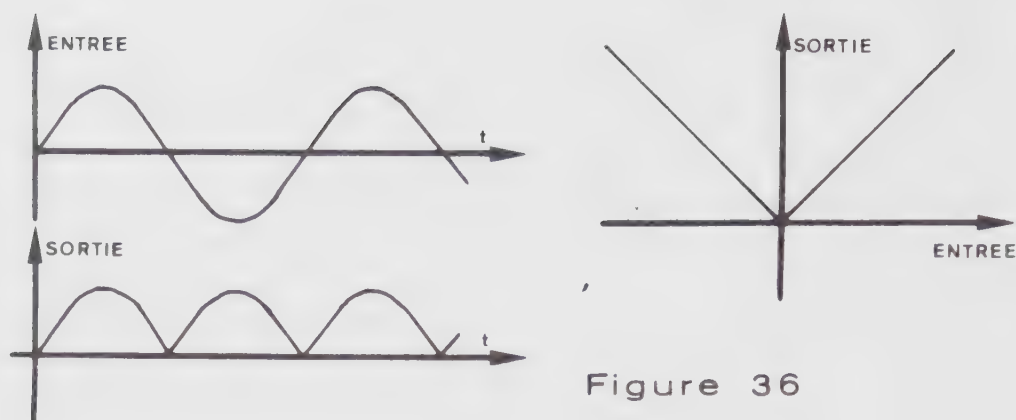


Figure 36

- Circuit quadratique :

L'élévation au carré de la tension issue de l'amplificateur-redresseur est accomplie par un module opérationnel dont le courant de sortie est proportionnel au carré de la tension d'entrée (BURR-BROWN, type 9875/19). Le principe de fonctionnement de ce module, tel qu'il est schématisé sur la figure 38, est fondé sur l'utilisation de réseaux diodes-résistances en vue d'engendrer une approximation par segments linéaires d'une fonction en loi carrée. La précision théorique est déterminée par le nombre de segments. La position des points où commence un nouveau segment, ou points de coupure est déterminée par les réseaux po-

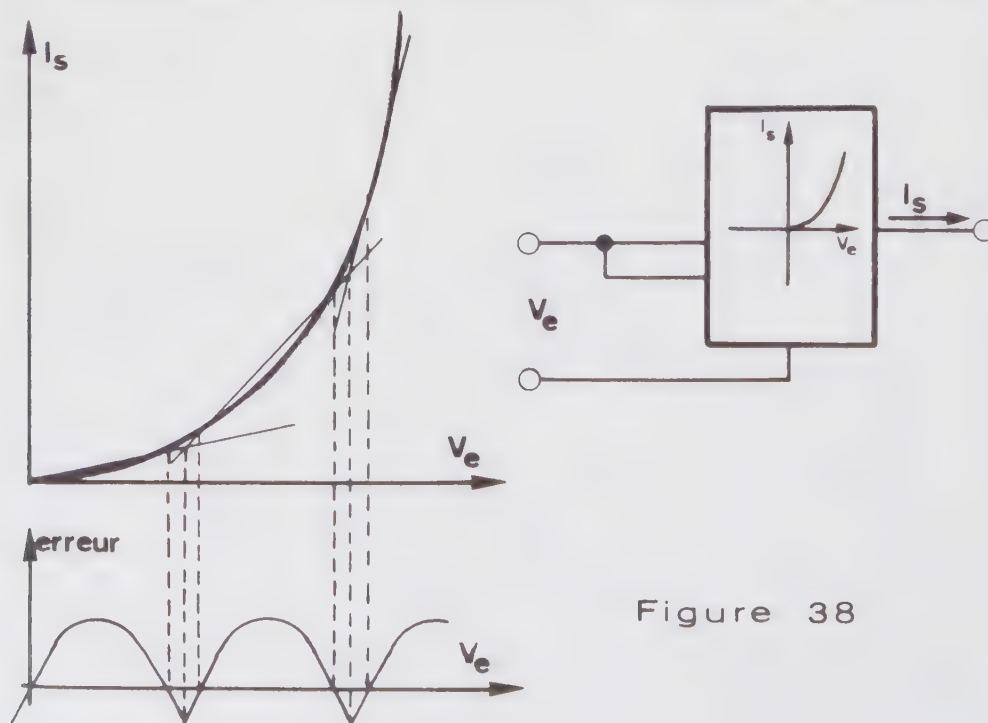


Figure 38

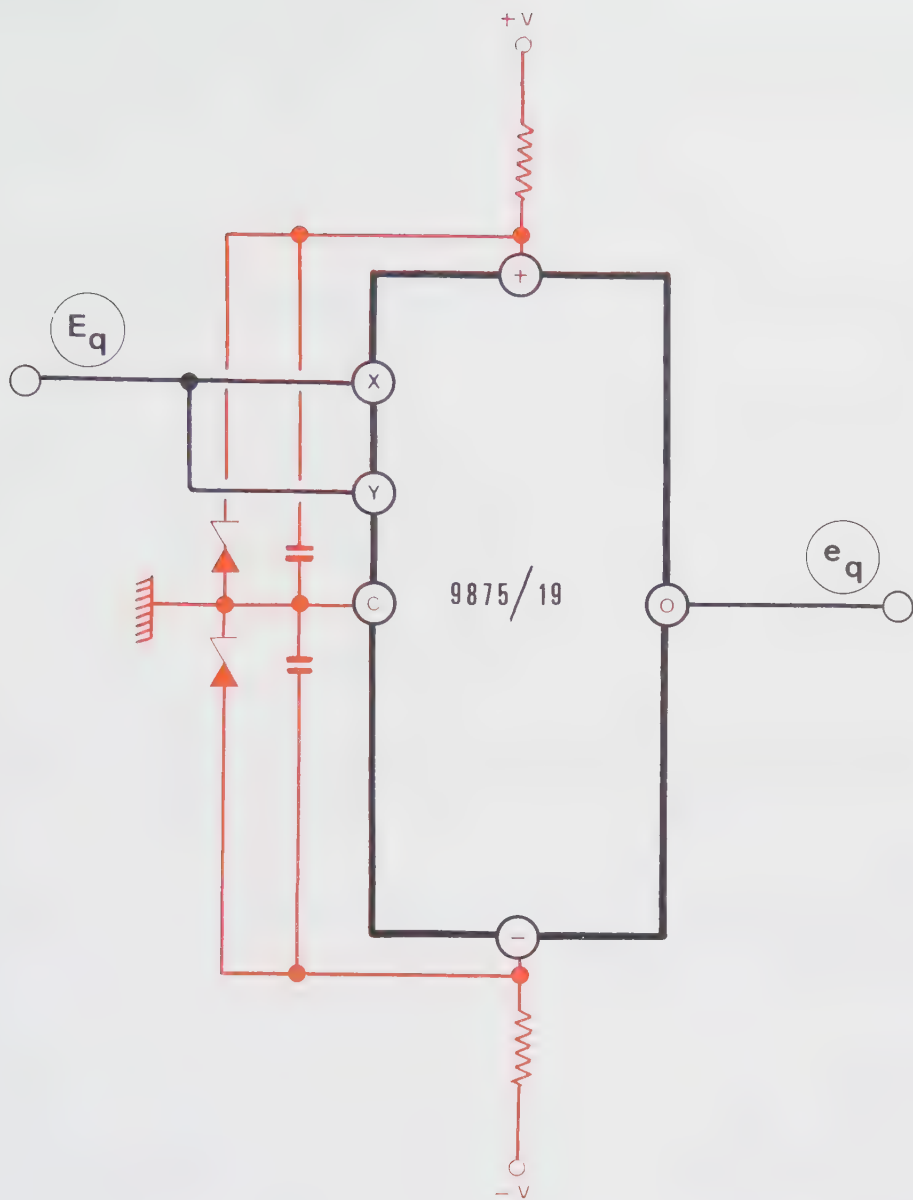


Figure 39 : **Circuit Quadratique**

larisés diodes-résistances. En pratique, ces points de coupure n'ont pas les arêtes vives comme représentées sur la figure, mais sont lissés par la caractéristique de saturation des diodes.

Le courant I_s délivré par ce module est tel que

$$I_s = V_e^2 / 10 \quad \text{si} \quad 0 \leq V_e \leq 10 \text{ volts.}$$

L'erreur absolue est inférieure à 1% jusqu'à la fréquence de 100 kilohertz. L'impédance d'entrée est de 100 kilohms ; le courant de sortie varie entre 0 et 1 milliampère (Figure 39).

Commutateur et Intégrateur :

L'ensemble de commutation et d'intégration est destiné à engendrer un nombre n d'impulsions proportionnel à l'intensité du courant d'entrée. Il est constitué d'une boucle qui comporte un intégrateur, un comparateur-limiteur et un commutateur analogique (Figure 40).

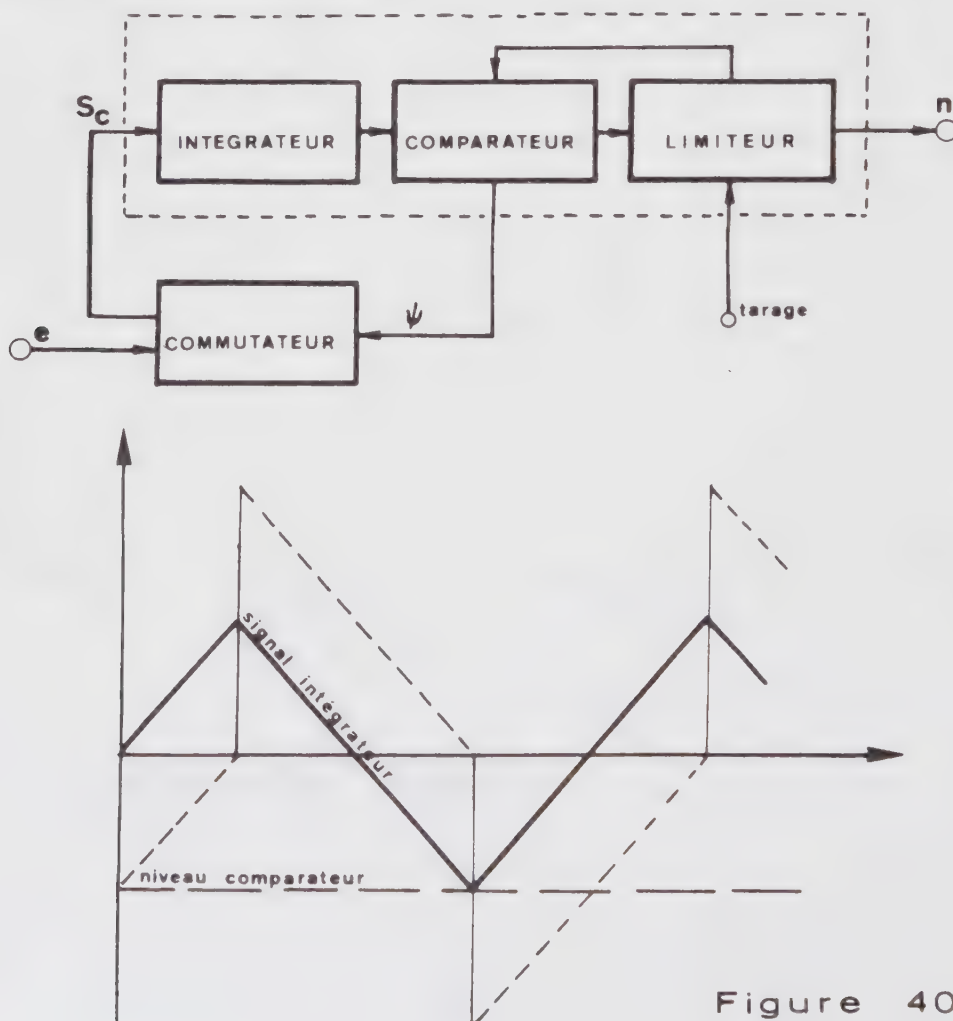


Figure 40

Le commutateur proprement dit (Figure 41) est un commutateur analogique construit sur le même modèle que celui que l'on utilise dans le Fluctuomètre (cf.III.3.2). Le signal d'entrée étant toujours positif, le signal de sortie sera tantôt positif, tantôt négatif.

Le schéma de réalisation de ce circuit est donné en figure 42.

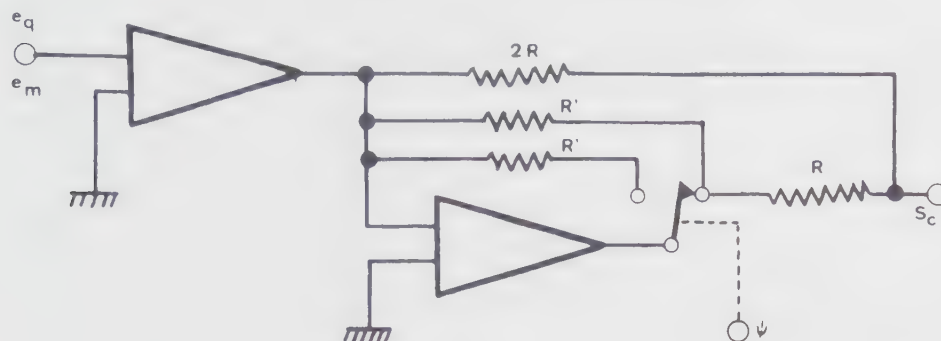


Figure 41

Si V est la tension aux bornes du condensateur C de l'étage d'intégration, nous avons $V = q/c = i T/C$; par conséquent, $T = 1/f = CV/i$ ou

$$f = \frac{i}{CV}$$

Les termes C et V étant constants, la fréquence des ondes émises par l'intégrateur est proportionnelle au courant i qui lui est injecté.

Les étages intégrateur et comparateur sont de type habituel, tels qu'on les voit en figure 43.

La sortie du comparateur est une onde carrée que l'on applique, par l'intermédiaire du commutateur, à l'entrée de l'intégrateur. La sortie de ce dernier, qui est alors tantôt une rampe positive, tantôt une rampe négative, est comparée à l'entrée inverse du comparateur. Lorsque le niveau atteint par la rampe est supérieur au niveau de l'entrée inverse, le niveau de sortie du comparateur change d'état, inversant ainsi, par le commutateur, la pente de la rampe. La sortie du comparateur est ainsi une onde carrée, mise en forme par un limiteur ; celle de l'intégrateur est une onde triangulaire.

- Base de temps :

Une horloge fournit, à des intervalles de temps réglables, les impulsions de commande d'ouverture et de fermeture d'une porte. Elle est constituée d'un générateur qui délivre des impulsions de fréquence 10 hertz, suivi de trois diviseurs de fréquence dont les signaux de sortie sont aux fréquences 1-0,1 et 0,01 hertz.

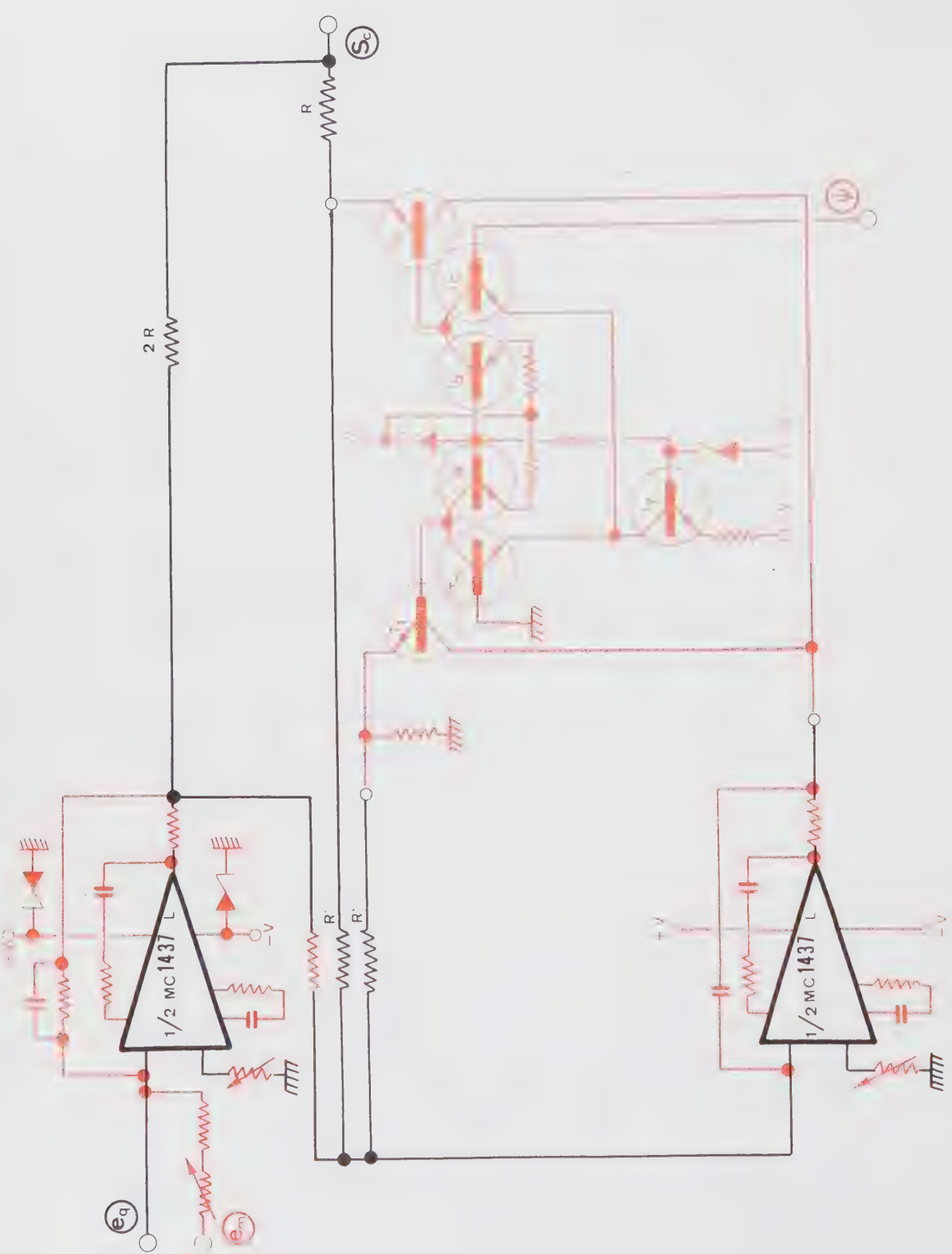


Figure 42 : *Computer*

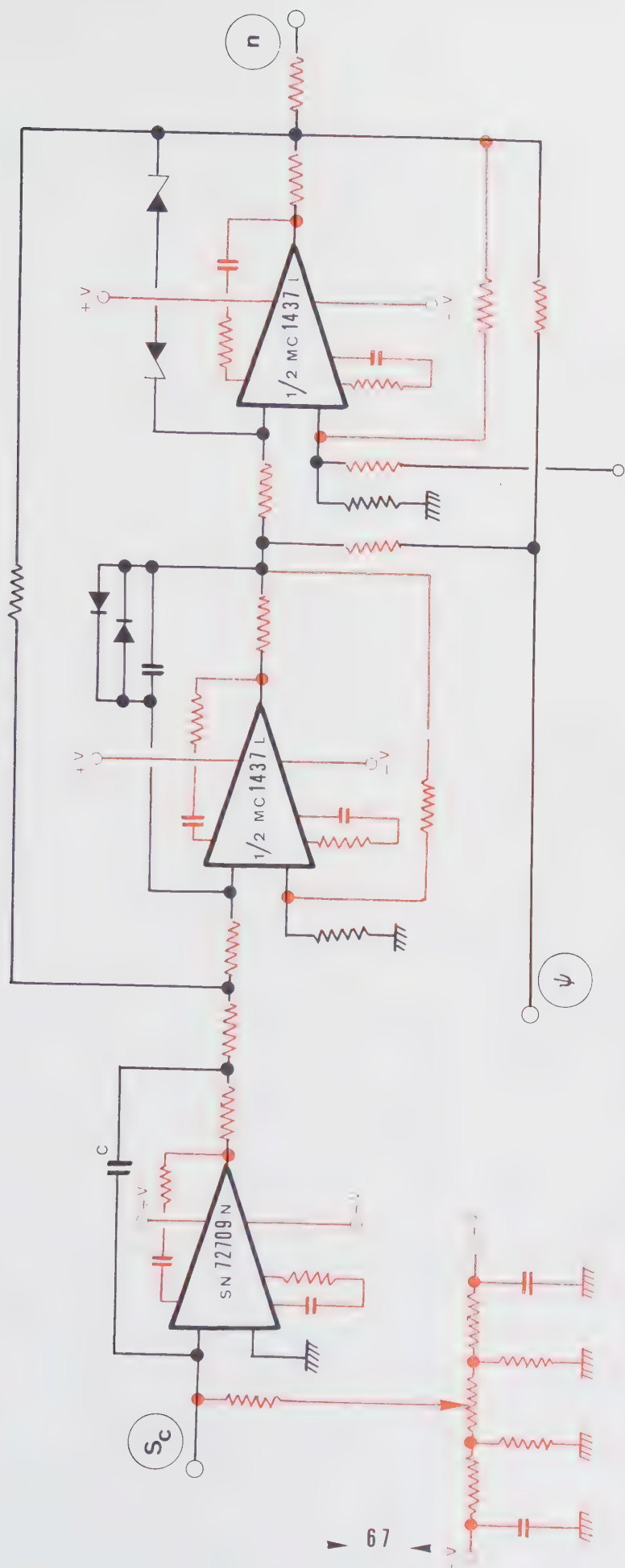


Figure 43 : Intégrateur, Comparateur et Limiteur

Le générateur (Figure 44) est réalisé au moyen d'un double amplificateur intégré MC 1437 L. Le premier amplificateur est utilisé en intégrateur, le second en comparateur.

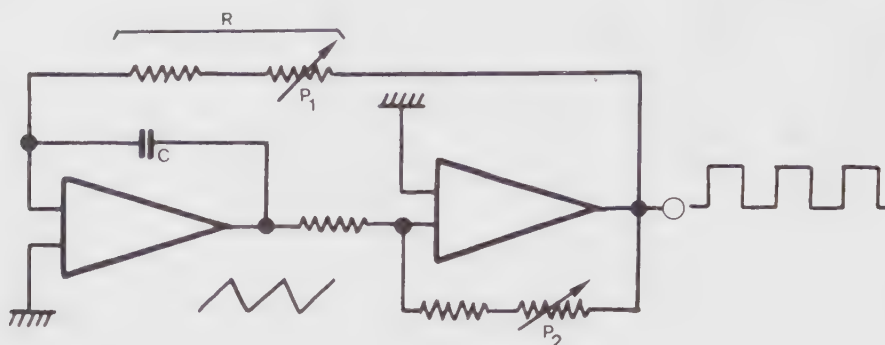


Figure 44

La tension aux bornes du condensateur C croît progressivement ; lorsqu'elle atteint le niveau de basculement du comparateur, une tension positive apparaît à la sortie de celui-là ; le condensateur C se décharge et le cycle recommence. Le comparateur délivre des impulsions rectangulaires dont la fréquence, définie par $f = \beta / RC$ (β = gain de boucle), est ajustée au moyen du potentiomètre P_1 de la boucle de contre-réaction totale, et dont l'amplitude dépend de la valeur du potentiomètre P_2 de la boucle de contre-réaction partielle du comparateur.

Comme on le remarque sur le schéma de la figure 45, nous avons fixé, au moyen de deux diodes de limitation, l'amplitude des impulsions de sortie à une valeur compatible avec les circuits logiques.

Les changements successifs de fréquence, divisions par 10, sont effectués par des décades, compteurs à dix positions type SN 7490 N.

Le signal de sortie de la base de temps, dont la fréquence est choisie en sélectionnant la touche correspondante d'un commutateur, est envoyé vers le circuit de programmation.

- Programmeur :

Le circuit de programmation (Figure 46) est composé de deux sous-ensembles dont l'un a pour fonction de délivrer des impulsions aux fréquences multiples de celle de la base de temps (1, 2, 3, ... 9) et dont l'autre assure le fonctionnement de l'appareil à partir d'informations de commande, intérieures ou extérieures.

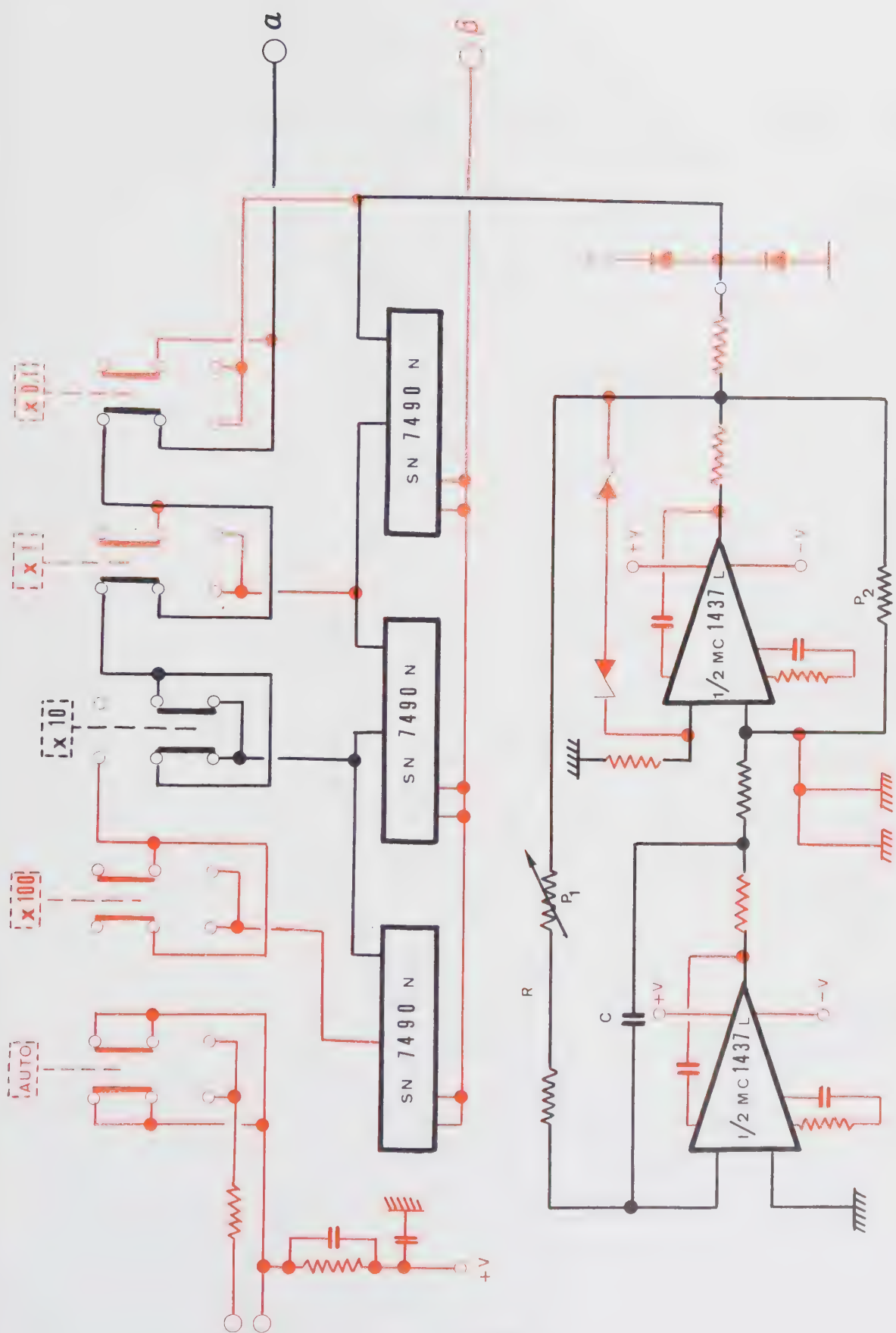


Figure 45 : Base de temps

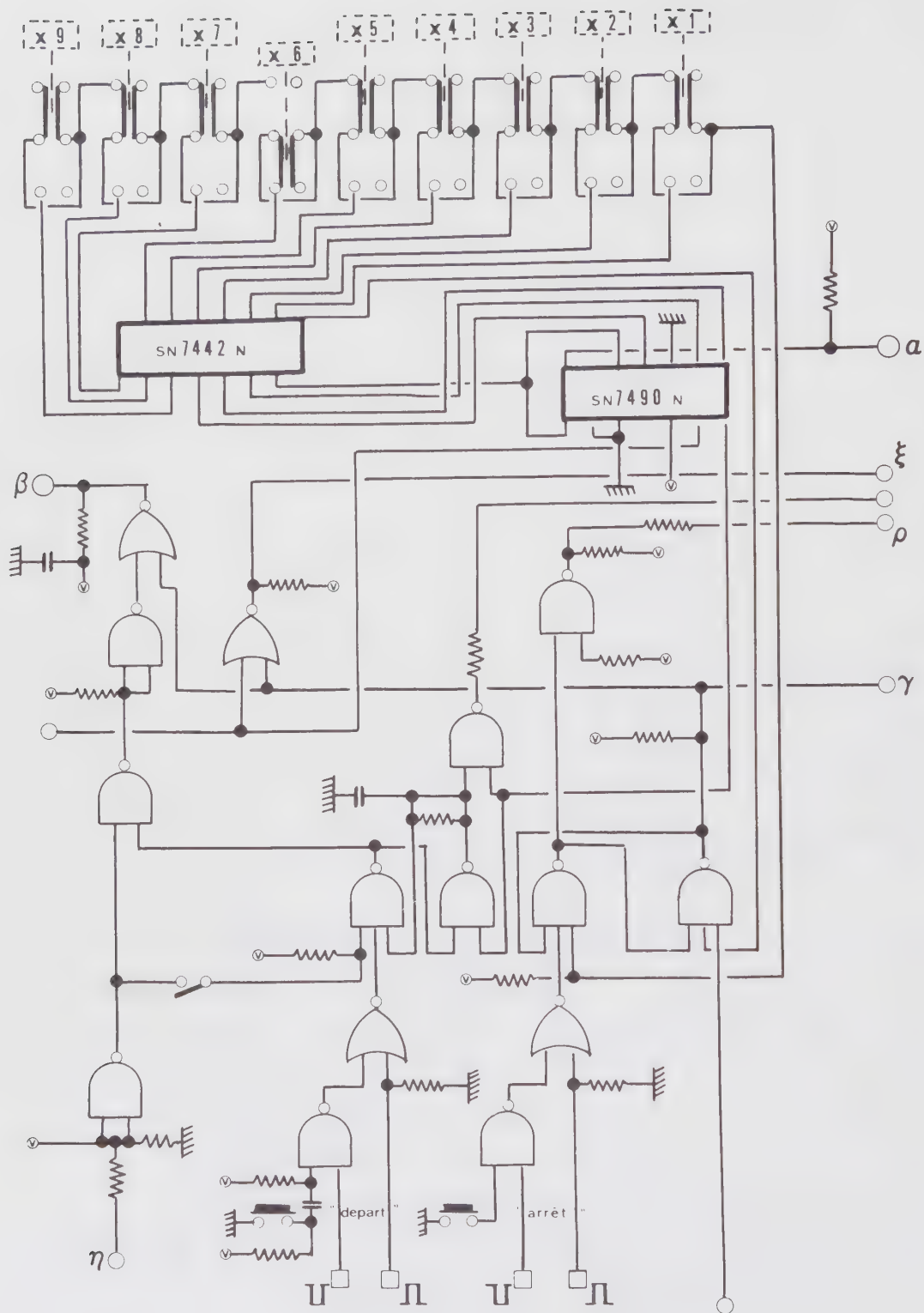


Figure 46 : Programmateur

- Porte :

Le circuit de la figure 47 est un interrupteur électronique dont les états ouvert et fermé sont commandés par les impulsions issues du programmeur. Pendant le temps τ de fermeture, prédéterminé par la conjugaison de la base de temps et du programmeur, cette porte laisse passer les impulsions en provenance de l'intégrateur, impulsions dont le nombre est alors proportionnel soit à la valeur moyenne soit à la valeur quadratique moyenne (durant τ) du signal d'entrée. Ces impulsions sont totalisées dans un compteur à six décades (figure 48).

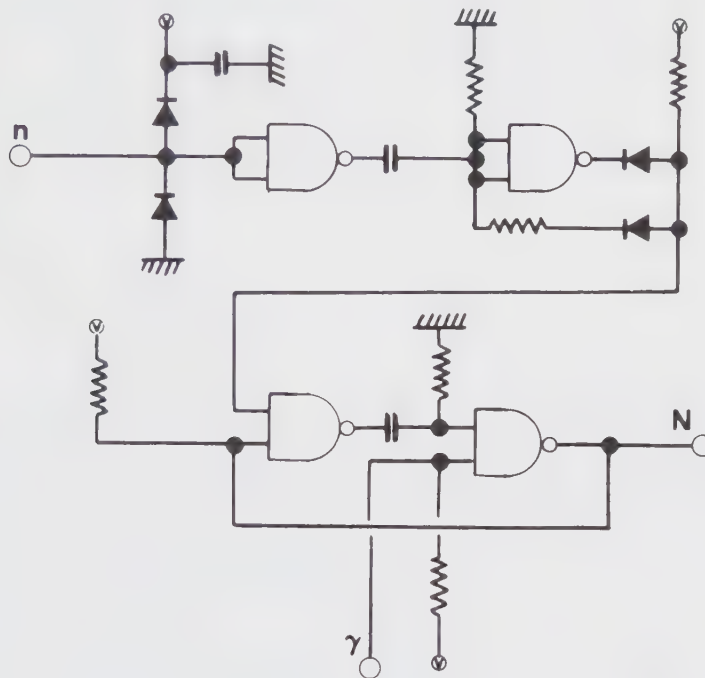


Figure 47

- Circuits complémentaires :

Des circuits complémentaires incorporés font du voltmètre intégrateur un instrument de mesure indépendant.

Une source de tarage permet d'effectuer un étalonnage tel que, en mesure de valeur moyenne, la valeur affichée soit en volts et égale, pour un gain unitaire, à la tension d'entrée. Une source de référence fournit une tension continue stabilisée, réglable, qui se superpose au signal d'entrée ; il est ainsi possible de donner une polarité unique à un signal d'entrée à double polarité par

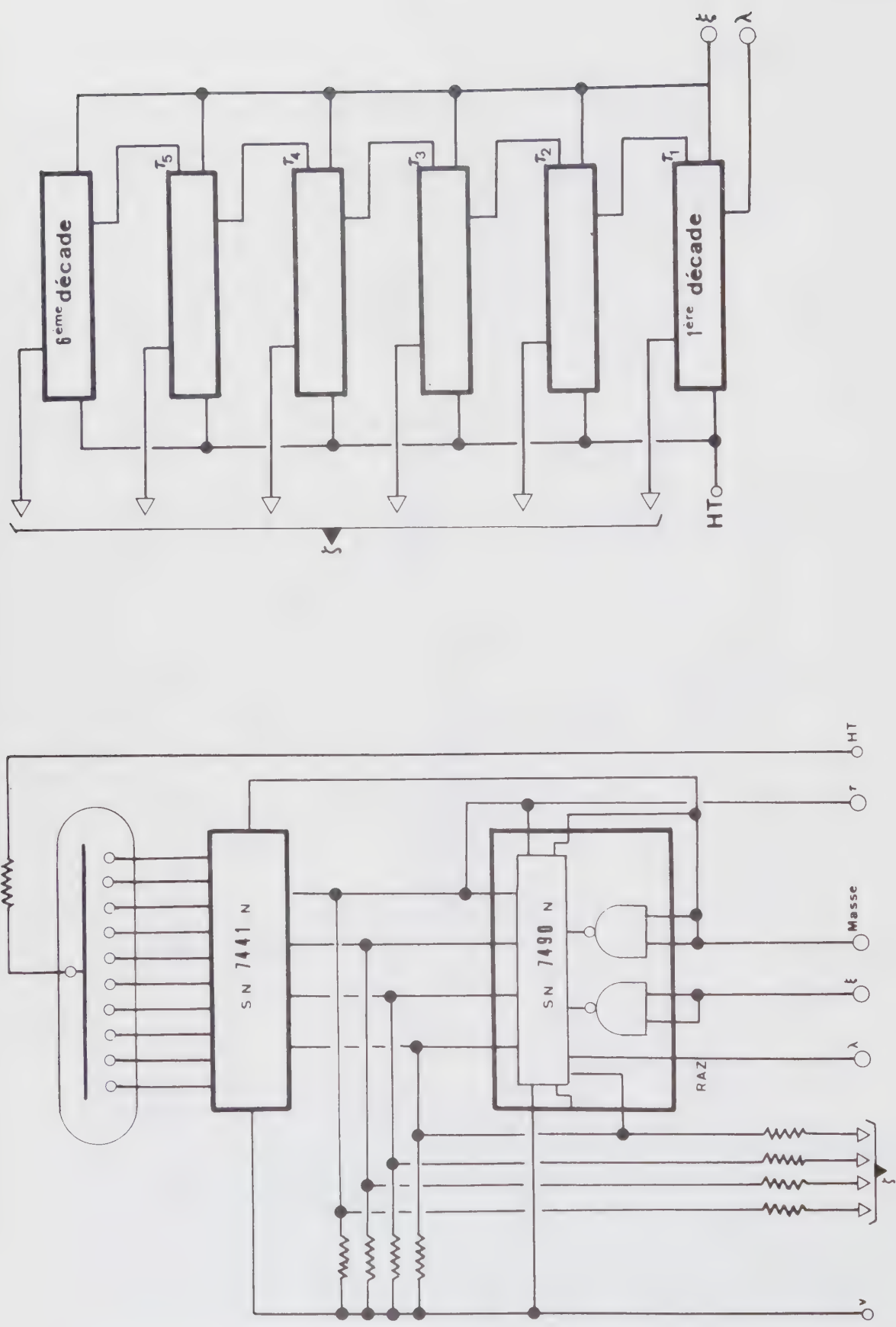


Figure 48 : Décade de comptage et Compteurs

déplacement du niveau moyen d'une valeur connue.

Enfin, un circuit de surcharge assume la visualisation optique d'un éventuel écrêtage du signal lorsque le gain choisi est trop grand.

Ces circuits complémentaires font l'objet de la figure 49.

III.4.4. Réalisation pratique

Les circuits de cet appareil, réalisés en modules fonctionnels sur cartes imprimées enfichables qui assurent une maintenance rapide, sont contenus dans un coffret aux normes internationales, de 3 unités de hauteur. Tous les éléments de réglage (gain, fonction, temps d'intégration, etc...) sont regroupés sur la face avant. Sur la face arrière sont disposées les bornes d'entrée des signaux de commande et les bornes de sortie des signaux logiques B.C.D.

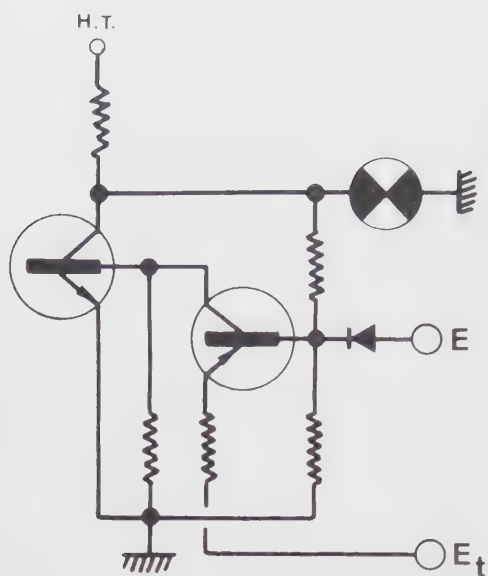
Une vue photographique du voltmètre est présentée en figure 31.

III.5. Appareillage annexe.

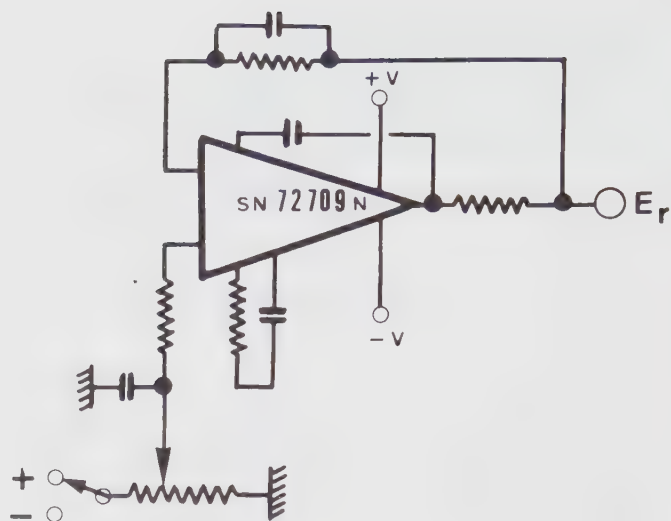
Un oscilloscope, nécessaire lors de l'utilisation du fluctuomètre de surface libre, permet, par visualisation des signaux d'entrées du comparateur-discriminateur, de régler le seuil de discrimination au niveau apte à diminuer l'influence des signaux perturbateurs. En outre, la trace obtenue sur l'écran est une représentation continue de l'évolution temporelle du point de la surface libre auquel on s'intéresse ; cette trace peut être enregistrée au moyen d'une caméra oscillographique à défilement continu. Un échantillon du signal fourni par le fluctuomètre est montré sur la figure 50.

Par souci de vérification continue, la température du liquide alimentant le micro-injecteur est mesurée au moyen d'une sonde à résistance et d'un thermomètre digital. La sonde est introduite dans l'écoulement au voisinage de la sonde de conductivité.

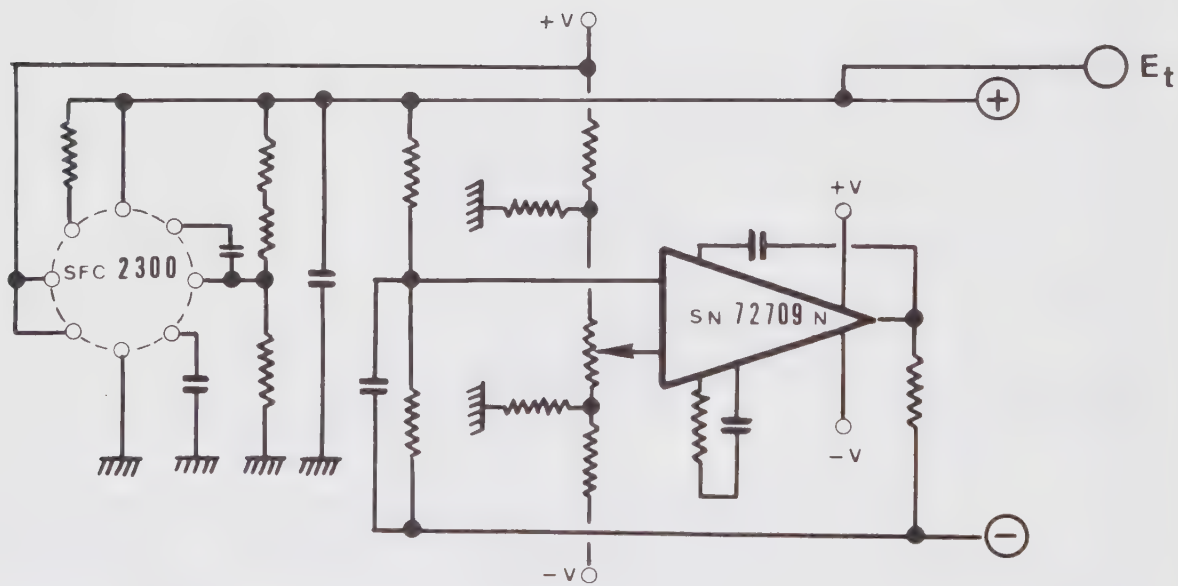
Pour faciliter les mesures et en accroître le rythme, les informations délivrées par le voltmètre intégrateur sont enregistrées sur une imprimante digitale ; en retour cette imprimante adresse au voltmètre les impulsions nécessaires à son fonctionnement automatique.



Circuit Surchage



Source Référence



Source Triage

Figure 49 : **Circuits complémentaires**

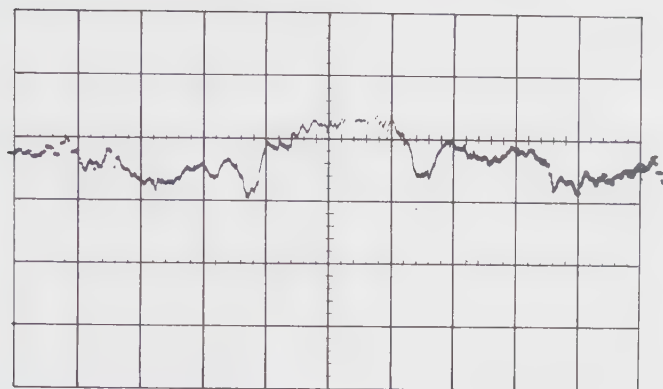


Figure 50: *Enregistrement de l'évolution dans le temps d'un point de la surface libre*

★ ★

CHAPITRE IV

ESSAIS ET RESULTATS

IV.1. Déroulement de l'essai

Lors d'un essai relatif à une vitesse moyenne $\bar{U}$ de l'écoulement, on veille, pour les raisons que nous avons précédemment exposées (cf. III.2.1.), et notamment pour éviter un nouvel étalonnage, à utiliser le même micro-injecteur et la même solution liquide. L'essai proprement dit est réalisé en trois périodes successives : la préparation, l'étalonnage, la mesure. La mise en oeuvre proprement dite de l'instrumentation est détaillée en Annexe II.

IV.2. Choix du temps d'intégration

Pour l'estimation statistique de la valeur moyenne de la variable ℓ , et éventuellement de son écart quadratique moyen, nous avons à déterminer la taille des échantillons des valeurs expérimentales.

La valeur expérimentale $\bar{\ell}_\tau$ que nous mesurons pendant un temps τ est une estimation de la valeur réelle $\bar{\ell}$. Il s'agit de déterminer le temps τ nécessaire à la mesure pour que $\bar{\ell}_\tau$ avoisine $\bar{\ell}$ avec un coefficient de confiance et un intervalle de confiance que nous nous fixons à priori.

Pour les mesures auxquelles nous nous intéressons, la taille de l'échantillon doit s'exprimer en temps d'intégration. Pour la détermination de ce temps, il a paru plus simple d'effectuer le calcul sur des éléments numériques après avoir choisi un temps d'intégration élémentaire arbitraire, par exemple $\tau_0 = 1$ sec.

Le calcul classique de la taille de l'échantillon en fonction de l'intervalle de confiance choisi à priori se ramène en définitive à la détermination du nombre n de périodes élémentaires que l'on devra relever ou aussi bien à celle

du temps d'intégration global $n \tau_0$ pendant lequel le voltmètre devra opérer l'intégration.

L'intervalle de confiance, le coefficient de confiance et la taille de l'échantillon sont liés. L'intervalle de confiance $i_{\bar{l}}$ relatif à la moyenne de l'échantillon $\bar{l}$ est lié à l'intervalle de confiance réduit i par la relation $i_{\bar{l}} = i \times q_{\bar{l}}$ dans laquelle intervient l'écart quadratique moyen relatif à la moyenne. Or, cet écart quadratique est une fonction de la taille n de l'échantillon : l'écart quadratique moyen $q_{\bar{l}}$ relatif à la moyenne $\bar{l}$ est lié à l'écart quadratique moyen q_l relatif à l'échantillon des valeurs l par $q_{\bar{l}} = \frac{1}{\sqrt{n}} q_l$. Cette relation, rigoureusement valable pour une répartition gaussienne et admise approximativement dans la pratique courante, découle du fait que les variances de la moyenne et de l'échantillon sont dans le rapport n , l'écart quadratique moyen étant la racine carrée de la variance. On estime q_l à partir de séries d'expériences préalablement effectuées

$$q_l = \sqrt{\frac{\sum (l^2) - \frac{(\sum l)^2}{n}}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (l^2) - \bar{l} \sum l}{n}}$$

Pour une taille d'échantillons $n = 50$, correspondant à 50 mesures de $\bar{l}$ intégrées chacune sur τ_0 , la longueur moyenne $\bar{l}$ du microjet est mesurée avec un intervalle de confiance $i_{\bar{l}} = 0,5\% \bar{l}$.

Pour des raisons pratiques, nous avons choisi d'effectuer 5 mesures successives, chacune étant le résultat d'une intégration pendant 10 secondes. Ce choix nous assure l'obtention de la longueur moyenne $\bar{l}$ avec un coefficient de confiance de 99,06%.

IV.3. Performances du détecteur

La température du système hydraulique d'éjection du microjet n'ayant pu être maintenue constante par un dispositif simple, les propriétés physiques du liquide du microjet, notamment sa résistivité et sa viscosité, sont soumises aux variations de la température ambiante. Par le biais des corrections apportées aux valeurs expérimentales au cours de chaque essai, les changements de résistivité n'influencent que la reproductibilité du coefficient de sensibilité du détecteur. Les variations de viscosité modifient le nombre de Reynolds.

IV.3.1. Diamètre du microjet

Nous avons cherché, au moyen des résultats expérimentaux d'étalonnages, à déterminer approximativement les diamètres des microjets obtenus. On y parvient en déduisant le diamètre d'une relation qui fait intervenir la résistance de tronçons successifs de microjet, en considérant que le microjet est constitué

d'une suite de colonnes liquides co-axiales de diamètre d et de longueur Δl égale à la valeur du pas utilisé lors de l'étalonnage :

$$d = 2 \sqrt{\frac{\rho i \bar{l}}{\pi \bar{e}}}$$

Les mesures effectuées avec de petites longueurs de microjet, pour lesquelles les valeurs de $\bar{e}$ sont excessivement perturbées, n'étant pas prises en considération, nous déterminons une valeur moyenne du diamètre égale à $99,6 \pm 0,1$ microns.

La contraction du microjet, après sa sortie de l'orifice, se trouve ainsi extrêmement petite. Pourtant, la régularité de l'écoulement laisse penser qu'il y a peu de chances que le jet recolle sur la paroi cylindrique du rubis avant de pénétrer dans l'atmosphère.

Du fait que la viscosité joue un rôle prépondérant dans l'écoulement du microjet, une modification du diamètre est susceptible d'intervenir à la suite de la réuniformisation de la vitesse. Cette réuniformisation entraînerait une diminution du diamètre d'autant plus sensible que l'effet de paroi du micro-injecteur serait plus important.

La géométrie choisie pour le micro-injecteur atténue sensiblement cet effet de paroi et explique en définitive la faible contraction observée.

Compte-tenu des très petites dimensions du microjet, il est possible aussi que l'arête de l'orifice de sortie ne forme pas un angle vif et que le rayon de courbure qui s'y substitue ne soit pas rigoureusement négligeable. Cela tendrait aussi à diminuer la contraction.

Si les essais de détermination du diamètre réel du microjet par microphotographie n'ont pas donné les résultats escomptés, en raison des difficultés d'éclairage, de l'indétermination du plan diamétral et de l'incertitude sur les valeurs successives des grossissements, ils ont néanmoins permis de vérifier l'invariabilité du diamètre en fonction de la longueur, et le caractère non dispersé du microjet.

Dans la gamme de vitesses que nous utilisons lors des essais ($17 \text{ m/s} < \bar{u} < 30 \text{ m/s}$), le nombre de Reynolds du microjet est compris entre 670 et 1200.

IV.3.2. Sensibilité relative à la détermination de la longueur du microjet.

Le coefficient de sensibilité S du détecteur a été précédemment dé-

fini comme le rapport de la variation de la tension e aux bornes du microjet à la variation de la longueur ℓ de ce dernier.

La tension e aux bornes du microjet de longueur ℓ parcouru par un courant i , étant égale à $\rho \frac{\ell}{s} i$, le coefficient de sensibilité S est égal à $\rho \frac{i}{s}$.

Puisque l'intensité i et la section s du microjet sont constantes, le coefficient de sensibilité est directement proportionnel à la résistivité du liquide composant le microjet.

En pratique, le courant i parcourant le microjet est égal au courant I fourni par le générateur diminué du courant absorbé par l'étage d'entrée de l'amplificateur de détection ; ce dernier étant d'environ 5 microampères, le courant i a une intensité de l'ordre de 275 microampères. Pour la valeur expérimentale du diamètre de microjet ($d = 99,6$ microns) :

$$S \text{ (V/cm)} = 3,53 \times \rho \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}$$

Les résultats obtenus au cours des essais ont donné

$$S \text{ (V/cm)} = 3,46 \times \rho \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}$$

avec des écarts de l'ordre de 5%.

En moyenne, le coefficient de sensibilité S du détecteur est voisin de 22 Volts par centimètre.

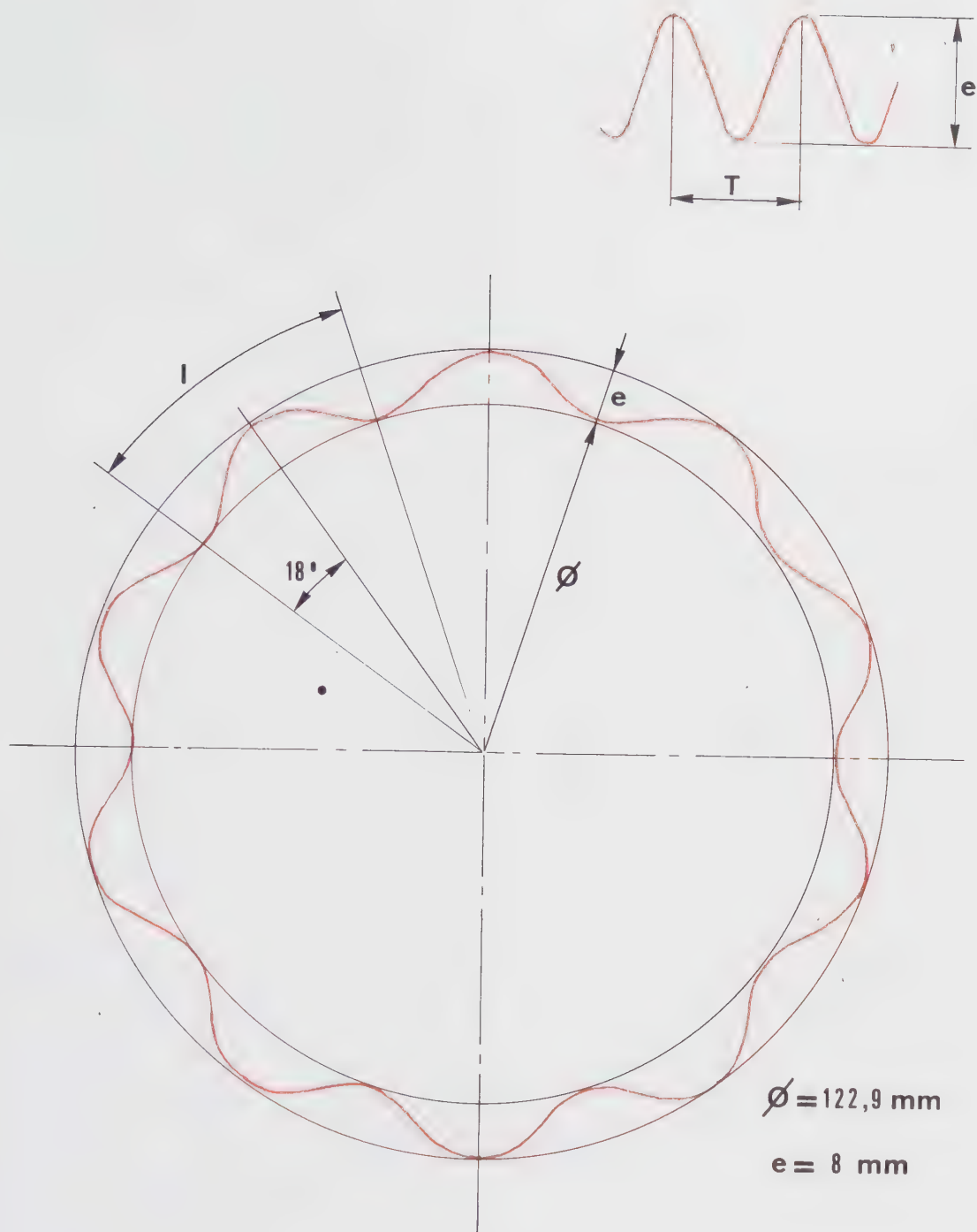
Ainsi la variation de tension aux bornes d'un microjet dont la longueur varie de 1 micron et de 2,2 millivolts.

Si cette grande sensibilité est appréciable dans le cas de mesure de très petites fluctuations, elle peut être gênante dans le cas de fluctuations de grande amplitude. En effet, la tension résiduelle aux bornes du microjet, tension e_r apparaissant pour une longueur nulle, est d'environ 5,2 volts, ce qui diminue d'autant la tension maximale possible aux bornes du microjet, et par suite la longueur utile de microjet à 24,5 millimètres. Si l'on considère que la couche d'air entraînée par l'écoulement à surface libre a une épaisseur maximale de l'ordre de 10 millimètres, l'amplitude maximale des fluctuations pouvant être mesurée est de $\pm 7,25$ millimètres.

IV.3.3. Sensibilité relative à la direction perpendiculaire au microjet.

La sensibilité transversale du microjet est définie comme la plus petite largeur de perturbation qui pourra être détectée. Cette sensibilité a donc pour limite inférieure la largeur de perturbation qui, à la vitesse $\bar{U}$ de l'écoulement, correspond au temps de réponse du système de détection à une variation brusque de la longueur du microjet.

Ce temps de réponse a été étudié par éjection du microjet sur des surfaces solides de formes appropriées, surfaces constituées par les contours de disques métalliques



$$T_{(\text{sec})} = \frac{l \text{ (mm)}}{v \text{ (mm/s)}}$$

Figure 51

Etalonnage : disque sinusoïdal

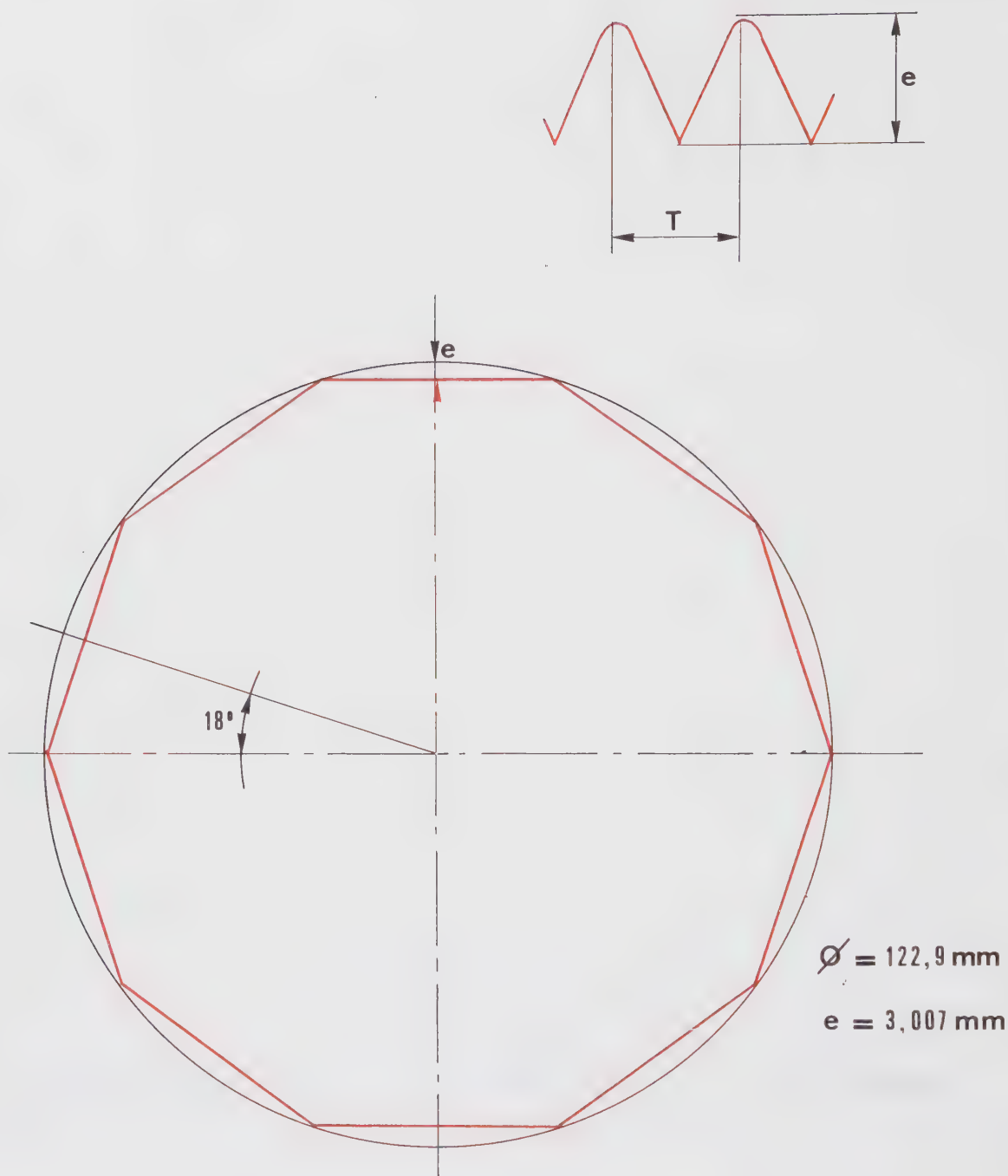


Figure 52

Etalonnage: disque décagonal

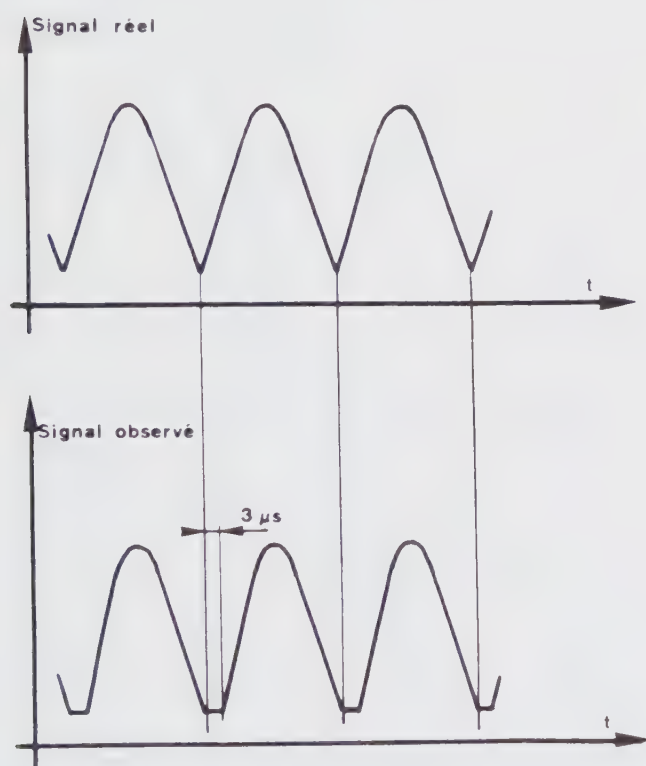
animés d'un mouvement de rotation uniforme. La forme des contours est déterminée de manière que leur développement linéaire représente le phénomène souhaité avec des amplitudes simulant celles des fluctuations d'une surface libre.

Deux disques sont ainsi utilisés ; l'un présente 10 développements sinusoïdaux d'amplitude 8 millimètres (figure 51), l'autre 10 découpes telles que leur développement présente des points anguleux (figure 52).

La période N du signal électrique observée aux bornes du microjet est liée à la vitesse de rotation du disque par la relation

$$N \text{ (secondes)} = \frac{1}{10 N'} \text{ (tours par seconde)}$$

Les caractéristiques de ce signal sont observées sur l'écran d'un oscilloscope.



L'amplitude est obtenue à mieux que 0,1%, la fréquence et les temps de montée à 0,5%. Le temps de réponse à un changement brusque de pente est d'environ 3 microsecondes.

Figure 53

IV.4. Performances de l'appareillage électronique

La stabilité de l'intensité I du courant fourni par le générateur, donc la stabilité de l'intensité i du courant parcourant le microjet, est, pour une température déterminée, de 10^{-4} en valeur relative ; ses variations en fonction de la température sont de l'ordre de $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$.

La précision du résistivimètre, après étalonnage, est supérieure à 0,1% ; sa dérive en température, due essentiellement aux dérives des circuits intégrés dont il est équipé, est d'environ $6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Compte tenu de la possibilité d'étalonnage des gains continu et alternatif du fluctuomètre, la tension fournie par cet appareil correspond à la tension qui lui est injectée à mieux que 0,5% ; sa bande passante, à 3 décibels, est de 500 kilohertz. Les dérives sont inférieures à $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

En mesure de tension moyenne et de tension quadratique moyenne, la précision du voltmètre intégrateur est de 1%. Sa bande passante, à 3 décibels, est de 100 kilohertz et sa dérive inférieure à $5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. La stabilité relative du temps d'intégration est de 10^{-4} en 24 heures. En mesure de rapport de temps, la précision est de 0,1%. L'impédance d'entrée est de 1 mégohm en parallèle avec 15 picofarads (ou 15 nanofarads pour les valeurs du gain supérieures à 30 décibels).

IV.5. Application à la dispersion des jets liquides pénétrant à grande vitesse dans l'air immobile.

Le fluctuomètre de surface libre que nous avons construit a été utilisé pour l'étude de certains jets liquides à grande vitesse pénétrant dans l'air immobile. Les résultats obtenus sont confrontés aux résultats antérieurement acquis [4 et 9]. Cette confrontation est essentiellement destinée à permettre d'apprécier l'apport de la méthode de détection par microjet et à en justifier l'intérêt. Aussi avons-nous limité nos expérimentations à une seule configuration de jet (jet issu d'un injecteur à paroi lisse, en aval d'une conduite lisse) et à trois vitesses d'écoulement.

IV.5.1. Modèle d'essai

Le modèle d'essai permet de former des jets d'eau à symétrie axiale dont la vitesse varie entre 8 et 30 mètres par seconde. Il comporte essentiellement une conduite de 140 millimètres de diamètre, en duralumin, revêtue intérieurement d'une couche de peinture siliconée afin d'en diminuer la rugosité, de longueur correspondant à 82 diamètres, au bout de laquelle on dispose d'un écoulement en régime hydrodynamique lisse. Cette conduite peut recevoir des injecteurs de types divers ; elle a été équipée d'un injecteur à paroi lisse de 33 millimètres d'orifice de sortie. Les divers éléments constitutifs de ce modèle d'essai sont représentés sur la figure 54, une vue photographique de l'ensemble de l'installation étant donnée en figure 55.

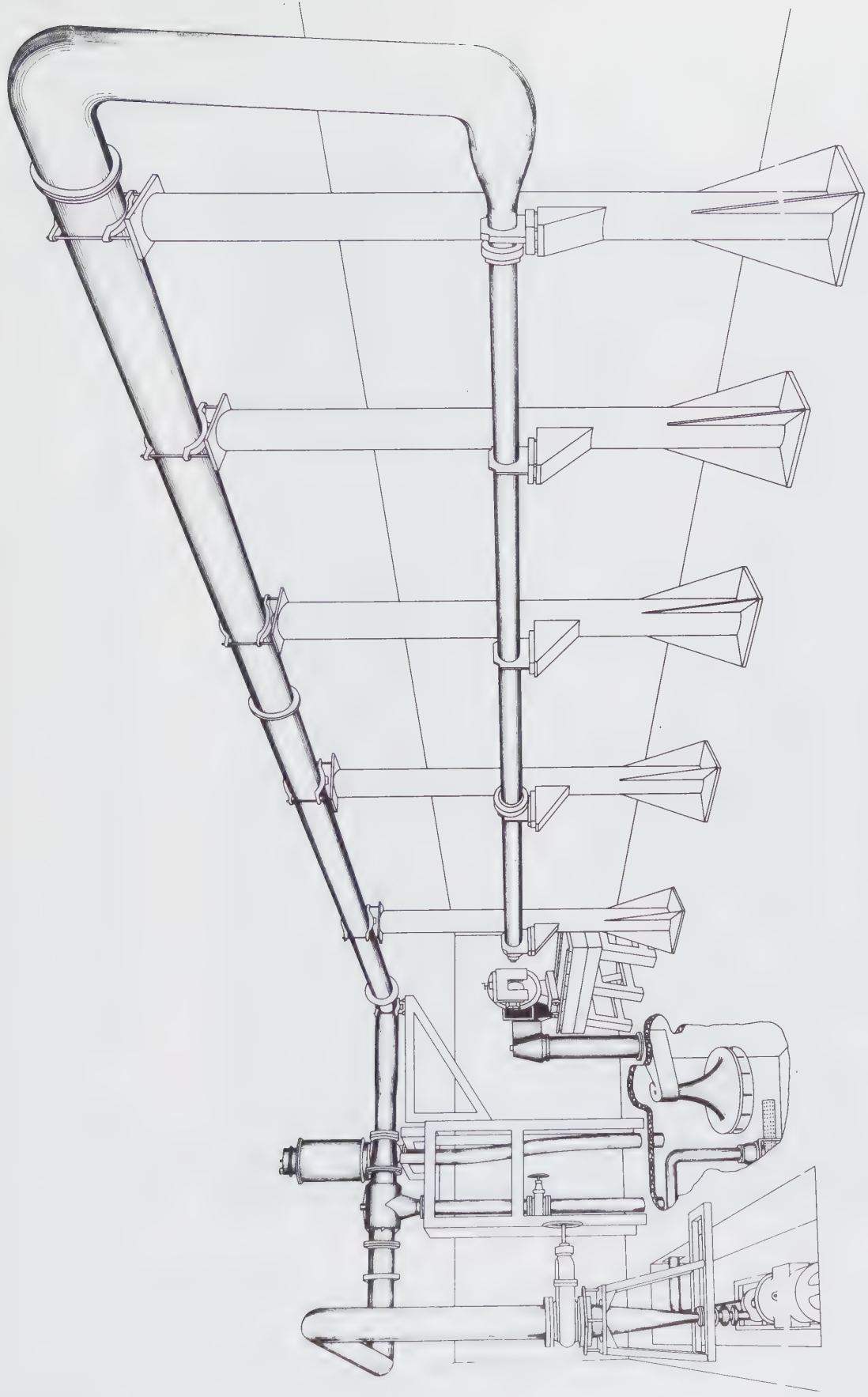


Figure 54 : *Modèle d'essai (Jets rapides)*

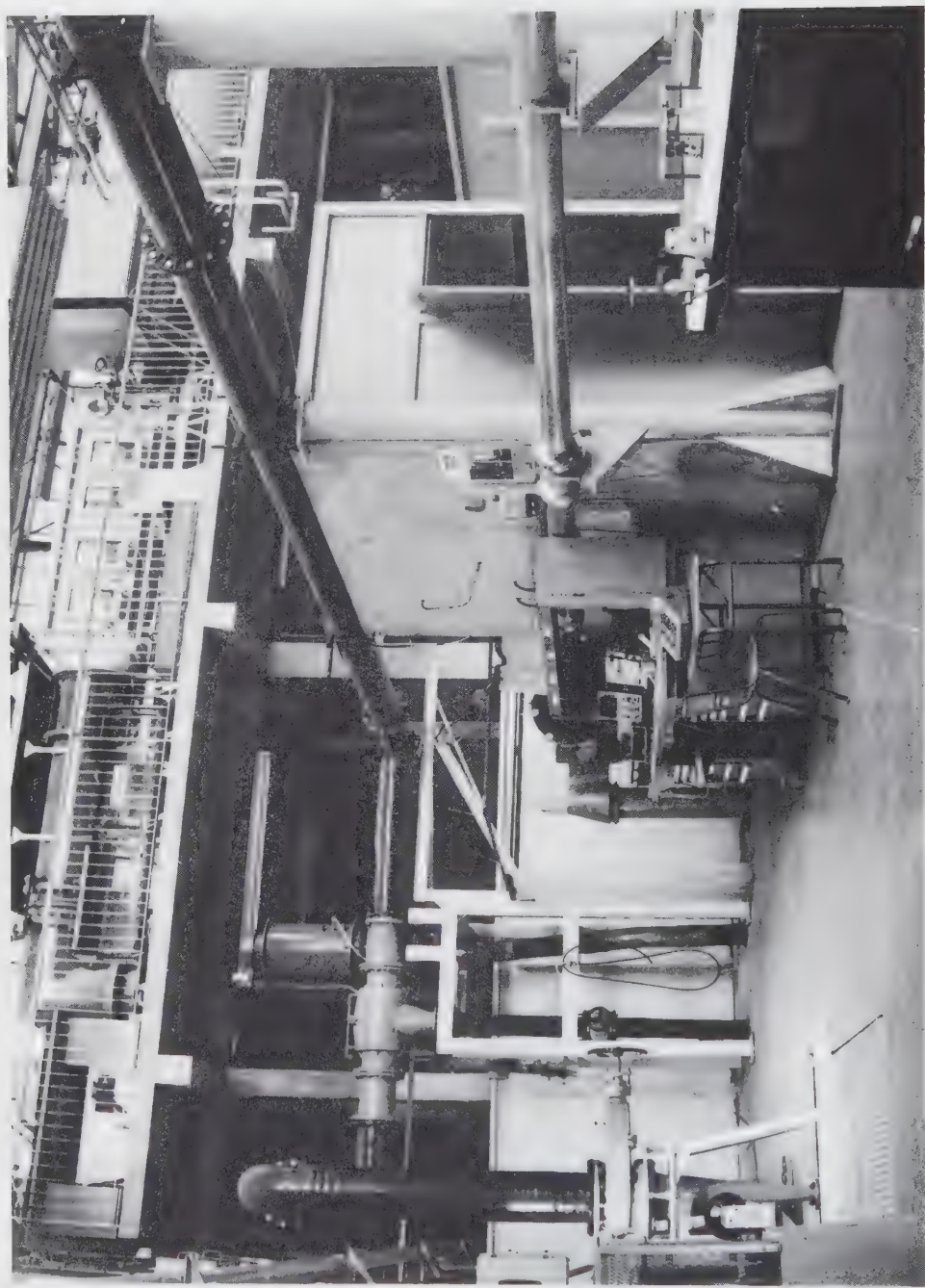


Figure 55: *Vue d'ensemble de l'installation expérimentale*

Un chariot de mesure (figure 56), chariot porte-détecteurs, matérialisé un système d'axes de coordonnées cylindriques-polaires (figure 57a). Son bati est mobile en translation longitudinale suivant la direction Ox (figure 57b). Ce chariot, qui peut recevoir deux micro-injecteurs identiques, solidaires l'un de l'autre, disposés de part et d'autre du jet, permet des déplacements de grande amplitude. Pour les réglages des détecteurs suivant les axes des ordonnées Oy et des cotes Oz , les supports sur lesquels ils sont fixés sont dotés de déplacements relatifs de petite amplitude, réalisés au moyen de vis micrométriques et mesurés à l'aide de comparateurs.

IV.5.2. Relevés de mesures.

Avant les mesures, on règle l'horizontalité de la conduite d'amenée, de l'injecteur et du banc ; ces réglages sont réalisés avec une incertitude angulaire de 2.10^{-4} . On détermine ensuite la section origine du banc avec une précision de l'ordre de 0,25 millimètre, de laquelle on déduit l'origine des abscisses.

La cote zéro est la cote du diamètre horizontal de l'orifice de sortie de l'injecteur ; pour des raisons pratiques, on détermine le diamètre horizontal moyen du jet dans une section proche de l'injecteur (section située à l'abscisse $x = 25$ millimètres). On explore, dans cette section, par déplacement du micro-jet suivant un axe vertical, les régions de fluctuations supérieure et inférieure du jet (Figure 58), telles que $\bar{l}_1 = \bar{l}_2$. On note les cotes z_1 et z_2 correspondantes :

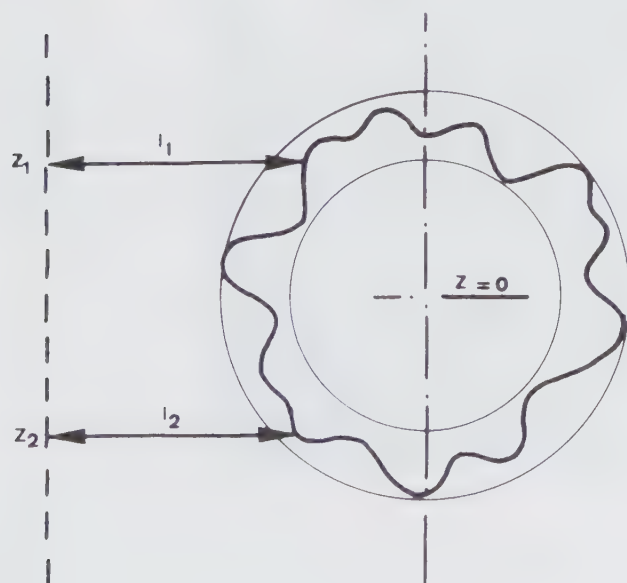


Figure 58

tes :

La cote

$$z = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

détermine la position cherchée, à laquelle on transporte le micro-injecteur.

Pour les mesures dans les sections plus éloignées ($x > 25$ mm), on procède de même, mais par suite des grandes fluctuations, la détermination y est plus malaisée. On peut toutefois se dispenser de rechercher chaque fois la cote du diamètre horizontal moyen en vérifiant que la cote déterminée expérimentalement suit avec une bonne approxima-

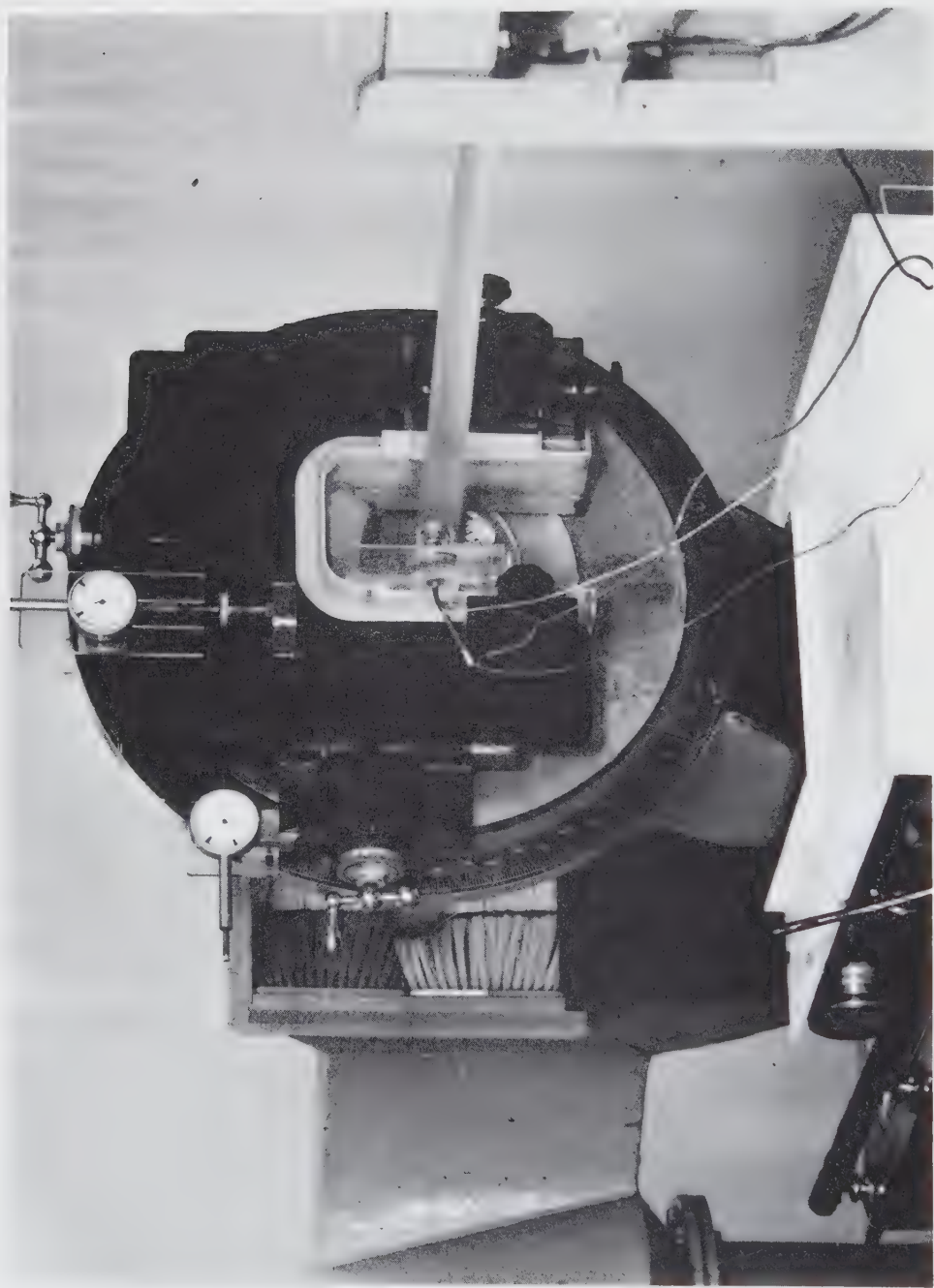
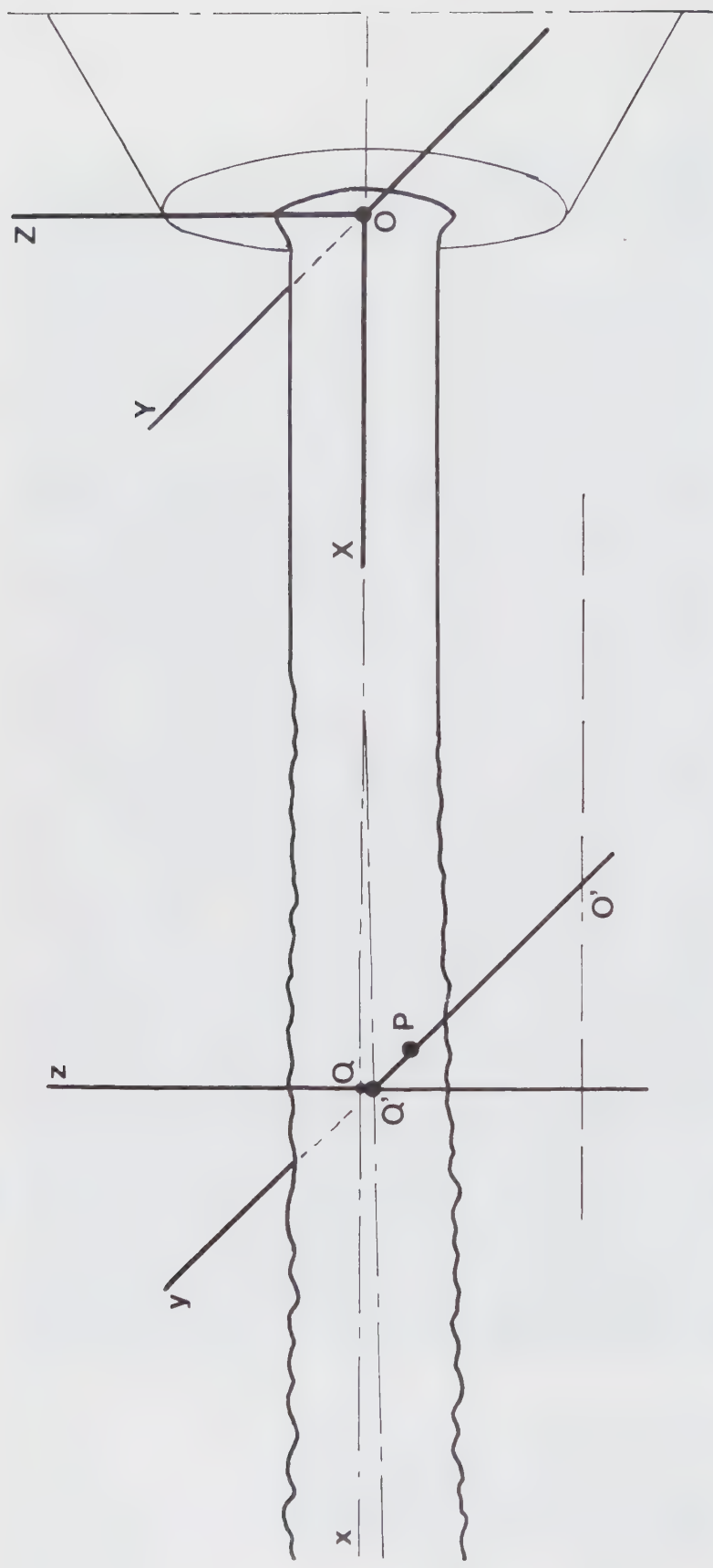


Figure 56: *Chariot de mesure*



La section de mesure est déterminée par son abscisse $x = OQ$

Le plan horizontal de mesure est à la cote $z = QQ'$

La position de l'axe des ordonnées est fixée par $O'Q'$

Figure 57 b : *Système d'axes de coordonnées*

tion la loi parabolique due à l'action de la gravité ; les écarts observés (Figure 59) n'excèdent jamais la marge d'erreur provenant des divers réglages. On utilise donc, pour le calcul de la cote z , la relation

$$z = - \frac{g}{2} \frac{(x - x_0)^2}{\bar{U}^2}$$

L'axe du micro-injecteur étant placé à la cote $z = 0$ du plan diamétral, dans la section $x = x_0 = 25$ mm, on détermine le repère conventionnel origine des ordonnées de manière que le microjet ait une longueur moyenne $\bar{\ell}$ adéquate ($\bar{\ell} = 10$ millimètres pour une vitesse $\bar{U}$ inférieure à 20 mètres par seconde ; $\bar{\ell} = 13$ millimètres pour une vitesse supérieure). Le micro-injecteur est ensuite déplacé suivant un plan parallèle au plan axial vertical du jet et passant par l'origine des ordonnées, pour être successivement placé aux abscisses des sections de mesure choisies.

IV.5.3. Résultats

Les investigations expérimentales ont porté sur la détermination de la position moyenne et des écarts quadratiques moyens des contours gauche et droit du jet, pour trois vitesses d'écoulement $\bar{U}$ de 17,9 m/s - 24,3 m/s - 29,3 m/s. Les relevés de mesure sont effectués dans six sections droites du jet, d'abscisses respectives $x = 25 - 50 - 100 - 200 - 300$ et 400 millimètres.

L'exploration des deux contours, gauche et droit, du jet est justifiée par la nécessité de vérifier le parallélisme de l'axe de déplacement longitudinal des micro-injecteurs avec le plan axial vertical du jet ; elle permet en outre la détermination du rayon moyen.

Variation du rayon moyen $\bar{r}(x)$: on peut justifier à priori la décroissance du rayon moyen en fonction de l'abscisse par un calcul basé sur la conservation du débit véhiculé par des tranches de jet présentant soit des fluctuations géométriques à symétrie axiale, soit des canelures cylindriques longitudinales à périodicité angulaire. Dans les deux cas, on trouve que l'évolution du rayon moyen suit une loi du type $\bar{r} = \sqrt{r_0^2 - \frac{a^2}{2}}$, a étant l'amplitude des fluctuations et r_0 le rayon du jet supposé non perturbé [9]. En admettant que les amplitudes des fluctuations soient dans tous les cas déterminées, en une abscisse donnée, par un taux de turbulence transversale, il y a lieu de penser que les amplitudes de fluctuations dans cette section, et par conséquent le rayon moyen, sont peu affectées par la variation de la vitesse du jet, surtout si la gamme de variation de celle-ci est relativement peu étendue.

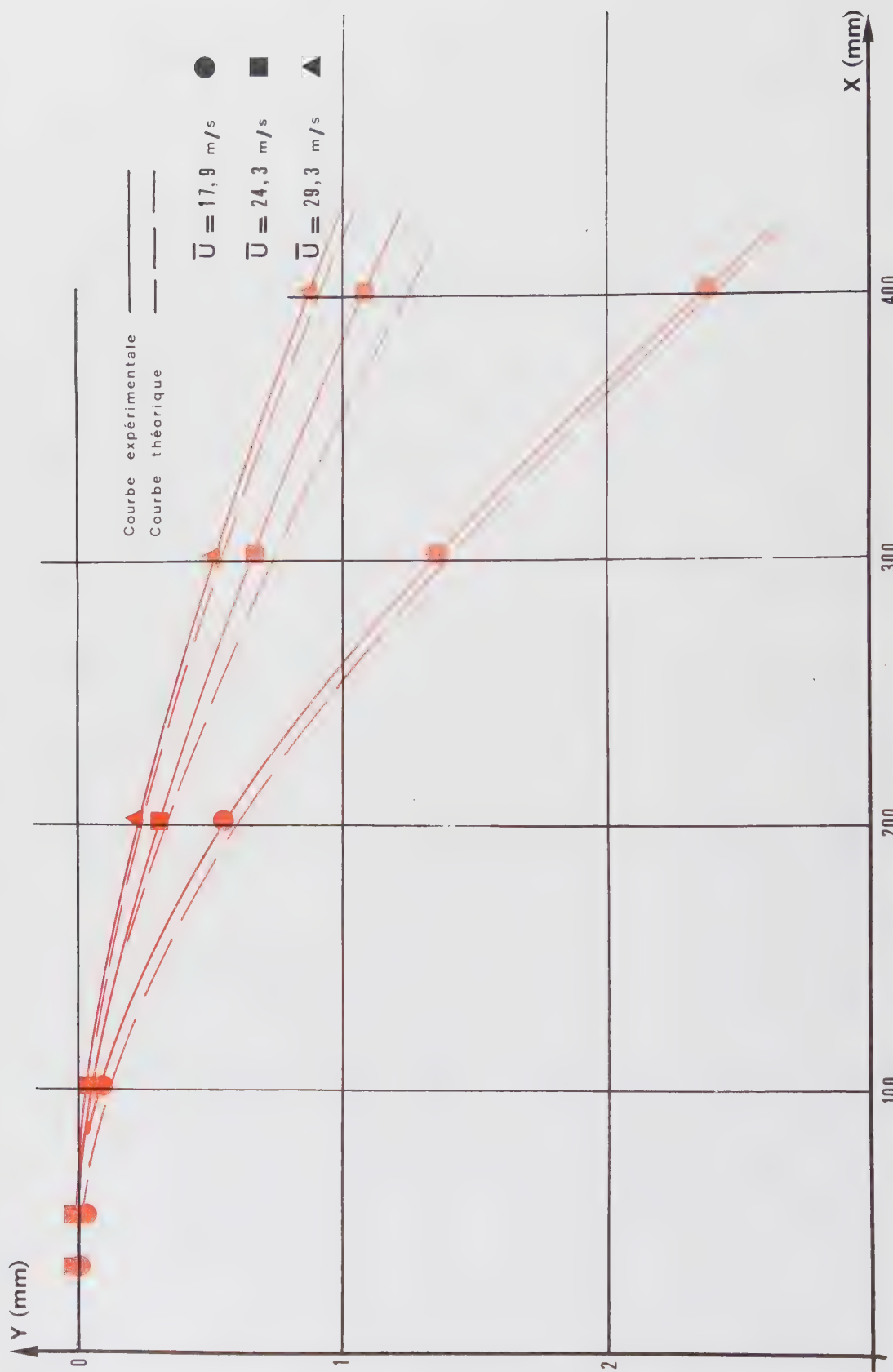


Figure 59: Détermination expérimentale et théorique de la cote du diamètre horizontal moyen



Figure 60: *Impact du microjet et de la surface libre*

Si, toutefois, une variation devait être observée, il est probable qu'à une augmentation de vitesse du jet correspondrait une augmentation de l'amplitude des fluctuations dans la section, et par conséquent une diminution plus accentuée du rayon moyen.

Les relevés expérimentaux consignés sur la figure 61, confirment ces résultats, ce qui n'avait pu être réalisé par les essais de HERAUD [9]. Cette divergence provient sans doute du fait que le procédé de détection utilisé par HERAUD (pointe immergée) [19] entraînait une erreur par excès sur le rayon moyen ; cette erreur pouvait masquer la décroissance du rayon lorsque l'amplitude des fluctuations, à laquelle elle est liée, était relativement petite ; ce qui est le cas lorsque la conduite d'amenée est lisse.

Variation de l'écart quadratique moyen $q(x)$: les résultats de nos essais (fig.62) font apparaître une loi d'évolution semblable à celle qu'avait obtenue D. HERAUD, avec des écarts qui n'excèdent pas 1%. Ils confirment la remarque déjà faite selon laquelle l'évolution de l'écart quadratique moyen est plus rapide qu'une simple évolution linéaire. Cette évolution impliquerait soit une instabilité propre des fluctuations géométriques de la surface libre, soit la diffusion de l'énergie cinétique turbulente du noyau du jet vers la surface.

IV.5.4. Précision

La connaissance des valeurs moyennes est entachée d'une incertitude globale dont une part revient aux erreurs liées au procédé de mesure. Ces erreurs sont partagées entre les erreurs d'origine mécanique, notamment les erreurs de réglage, et les erreurs d'origine électrique introduites tant par le système de détection que par l'appareillage électronique de traitement et de mesure.

Les erreurs d'origine mécanique comprennent celles qui résultent des réglages et celles qui sont inhérentes à l'utilisation du microjet.

Erreurs de réglage : ce sont celles qui se répercutent sur la détermination des coordonnées du point de mesure. Les erreurs dans le repérage des cotes interviennent systématiquement sur la détermination de la position du diamètre horizontal, dans chacune des sections de mesure ; elles sont toujours inférieures à 0,1 millimètre. L'erreur angulaire d'horizontalité du micro-injecteur est de l'ordre de 10^{-4} radian. L'erreur sur les abscisses x , de l'ordre de 0,25 mm, est négligeable en raison du caractère progressif du phénomène. L'erreur sur les ordonnées y intervient essentiellement au cours des étalonnages, effectués dans une section où les fluctuations sont de très faible amplitude ; elle

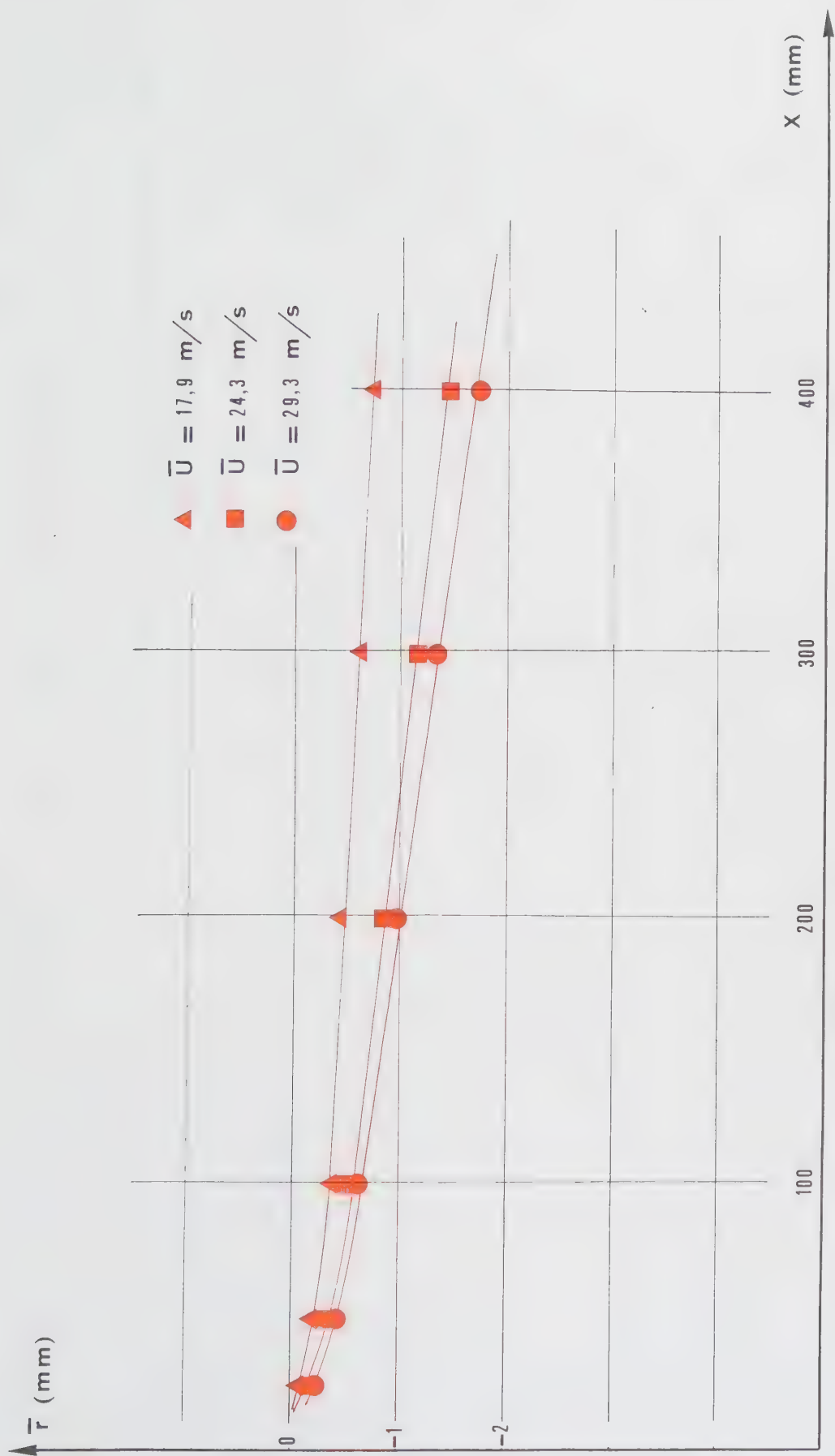


Figure 61 : Evolution du rayon moyen

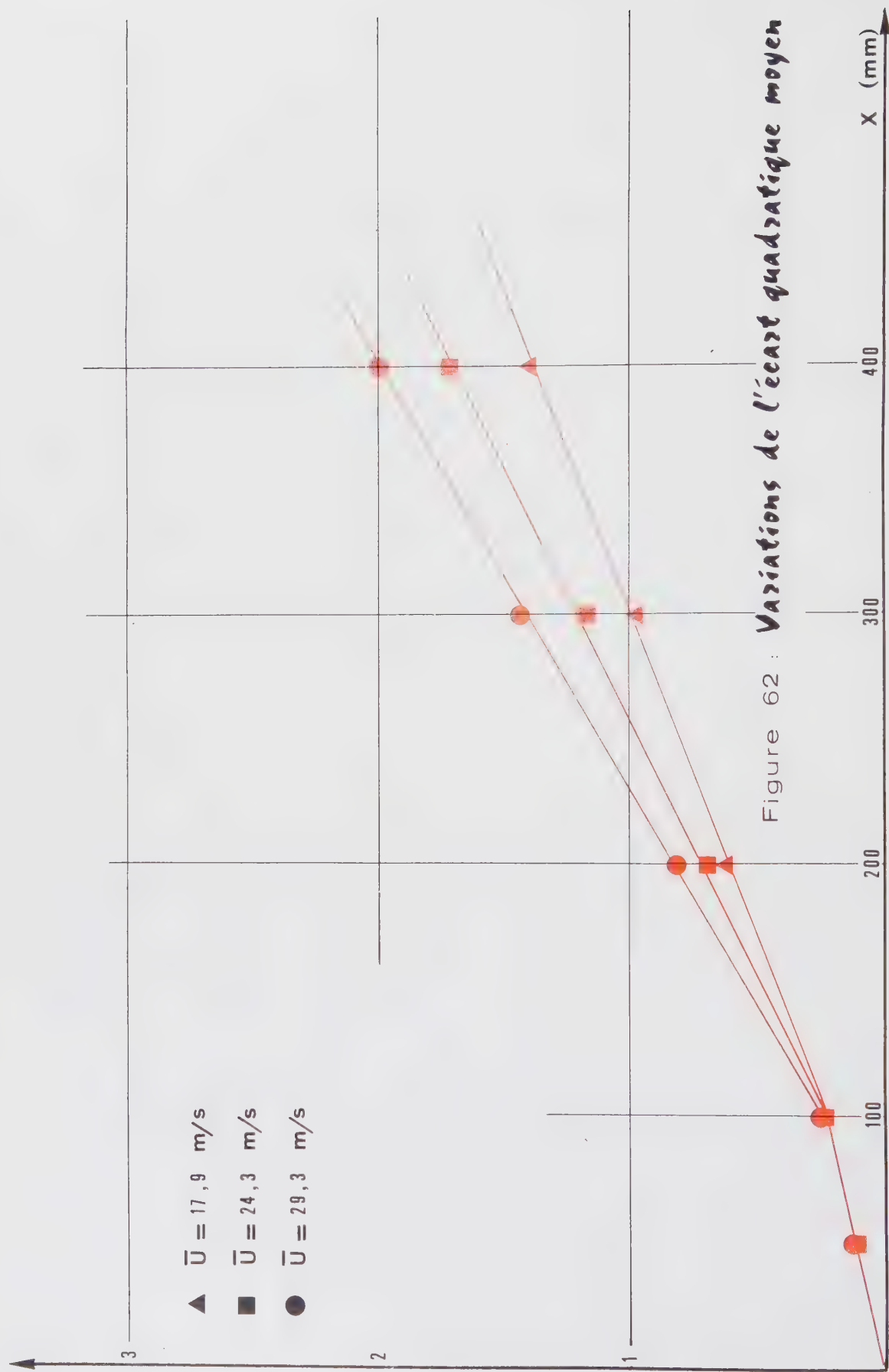


Figure 62 : Variations de l'écart quadratique moyen

affecte le positionnement du micro-injecteur lors de l'établissement d'un court-circuit, donc la définition du repère conventionnel des ordonnées ; elle est dans tous les cas inférieure à 0,01 millimètre, y compris l'incertitude sur la distance séparant la face externe du micro-injecteur de la face interne du rubis.

Erreurs introduites par le microjet : aux erreurs de réglage des coordonnées s'ajoutent deux erreurs propres au microjet. L'une provient de la déformation de la surface libre au point d'impact (figure 60). Si, dans la plupart des cas, le diamètre du microjet peut être négligé devant les dimensions des fluctuations, ces dernières peuvent être déformées par suite d'effets d'inertie, d'entraînement d'air et, éventuellement de tension superficielle. Faute d'avoir pu étudier en détail l'écoulement au point d'impact, il ne nous est pas possible d'évaluer convenablement cette erreur. L'autre est consécutive à la déviation du microjet par la couche d'air entourant le jet et entraînée par celui-là ; cette déviation provoque essentiellement un déplacement du point d'impact suivant l'axe Ox, et accroît l'erreur sur les abscisses. Un calcul de la déviation effectué, en supposant une loi d'évolution de la vitesse dans la couche limite en puissance 1/7, dans une couche d'épaisseur 1 centimètre révèle un déplacement du point d'impact du microjet de l'ordre de 0,01 millimètre lorsque les vitesses du jet et du microjet sont du même ordre de grandeur. L'erreur qui en découle est donc généralement négligeable.

Erreurs d'origine électrique : ces erreurs proviennent de la succession d'incertitudes attachées aux paramètres caractéristiques de chacun des circuits électriques et électroniques : gains, temps de réponse, temps d'intégration, résistivité. En fait, l'erreur maximale est donnée par les limites de sensibilité transversale et longitudinale du procédé global de détection et de mesure. Nous avons vu précédemment que ces limites correspondent à une fluctuation de 1 micron d'amplitude et de 3 micro-secondes de durée. Cette durée est celle d'une fluctuation de 0,03 millimètre de dimension longitudinale se déplaçant à 10 mètres par seconde.

L'erreur globale due aux divers circuits de mesure est de l'ordre de $\pm 1,5\%$.

IV.5.5 Fidélité

En raison des corrections systématiquement apportées aux relevés de mesure, la fidélité est essentiellement liée à la stabilité des instruments électroniques et du détecteur. La stabilité des instruments n'intervient que pendant la

durée d'une mesure, par exemple d'un étalonnage ; en effet, des vérifications et des ajustements sont effectués entre chaque mesure au moyen des références propres à chaque appareil. Cette stabilité est, dans tous les cas, meilleure que 10^{-4} .

La stabilité du détecteur dépend des dépôts éventuels d'impureté à l'orifice du micro-injecteur, qui dévient le microjet dans son ensemble. On peut s'affranchir de cet inconvénient d'une manière acceptable sous réserve d'une observation attentive.

En définitive, la fidélité globale du procédé, qui ne peut être évaluée qu'à partir de la dispersion observée dans les résultats expérimentaux, est de l'ordre de 2%.

Pour l'évaluation de cette fidélité, nous avons dû tenir compte du fait que l'écoulement sur lequel nous avons expérimenté notre système de mesure est un écoulement en circuit fermé. L'introduction, faible mais continue, d'un solvant à forte conductivité dans l'écoulement (par le microjet) modifie notablement sa résistivité. En conséquence, l'influence de la résistance du volume liquide pris en considération dans le circuit électrique de détection croît avec la durée des essais.

Divers phénomènes chimiques annexes, formation d'émulsions, dépôts visqueux le long des parois, etc..... nous ont par ailleurs contraints à changer très souvent l'eau de la capacité.

IV.6. Conclusion

Le fluctuomètre de surface libre que nous avons étudié, réalisé et expérimenté présente, en regard des dispositifs antérieurement utilisés, des performances avantageuses, propres à garantir des mesures fines en laboratoire.

Outre le fait que l'on atteint directement la position instantanée de la surface libre, on peut en suivre l'évolution temporelle et soumettre l'information obtenue aux procédés habituels de traitement, analogique ou numérique.

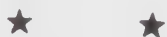
La sensibilité qui permet la détection de fluctuations d'un micron d'amplitude et leurs mesures avec la précision relative de 10^{-2} répond aux besoins exprimés, notamment au cours des recherches sur le comportement des surfaces libres de jets liquides à grande vitesse.

Cependant ces avantages ne sont obtenus qu'au prix d'inconvénients qu'il ne faudrait pas négliger. Certain de ces inconvénients peuvent trouver remède et donc n'être considérés que comme provisoires ; d'autres, au contraire, apparaissent comme irréductibles.

Le choix d'une valeur aussi petite que celle que nous avons utilisée pour le diamètre du microjet a imposé à ce dernier une vitesse relativement grande ; par là même, les vitesses des écoulements qui peuvent être étudiés au moyen du dispositif

actuel sont également grandes. Toutefois, dans la plupart des études effectuées en site industriel, on peut envisager de sacrifier la sensibilité de manière à utiliser l'appareil pour des mesures relatives aux écoulements à plus faibles vitesses. Parmi les inconvénients provisoires, nous classons aussi celui qui découle de la composition chimique de la solution employée, qui n'est peut-être pas la plus appropriée. Il paraît donc souhaitable que soient étudiés conjointement le comportement du microjets de diamètre supérieur au dixième de millimètre et l'emploi d'une solution dont l'action des composants serait moins néfaste aux éléments mécaniques du dispositif. Une étude approfondie de solutions visqueuses et électriquement conductrices est à envisager ; au cours de cette étude il faudrait prendre en considération aussi l'influence de la température, qui est actuellement un inconvénient sérieux.

Une cause d'erreur estimée irréductible est due aux perturbations de la surface libre au point d'impact du microjet. Les dimensions de la zone en cause étant particulièrement réduites, il n'est pas possible d'en connaître exactement les déformations. Il faudra toujours s'assurer que ces déformations restent de faible importance et qu'elles n'influencent pas d'une manière inadmissible les résultats expérimentaux.



ANNEXE I
FLUCTUOMETRE DE SURFACE LIBRE
POUR MESURES IN - SITU

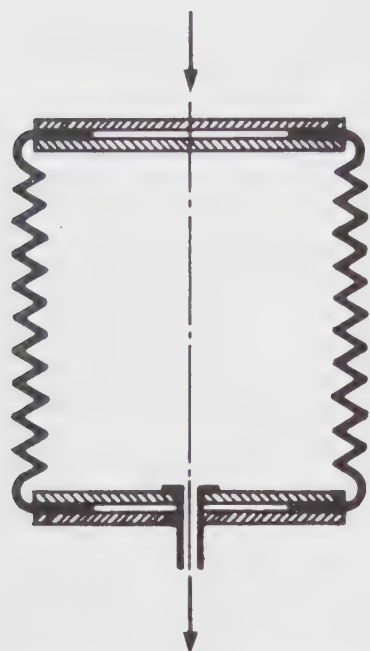
Le procédé de mesure que nous avons conçu et réalisé présente l'inconvénient d'être complexe et difficilement transportable. Il serait pourtant intéressant d'utiliser ce système de détection par microjet pour relever les positions de surfaces libres là même où elles se présentent. Les domaines dans lesquels un tel système s'avère utile sont nombreux, ainsi que cela a été exposé au Chapitre I.

Les applications citées imposent que des essais soient faits sur des machines industrielles. Il est toutefois certain que, pour de tels emplois, la sensibilité offerte par le dispositif de mesure actuel n'est pas indispensable, et qu'on peut la sacrifier partiellement au profit d'autres qualités.

Nous sommes ainsi amenés à envisager la mise au point d'un fluctuomètre de surface libre de dimensions réduites, de moins grande sensibilité et d'utilisation simple et rapide. En pratique, cela revient à concevoir un nouveau système hydraulique d'éjection du microjet ; les systèmes électroniques de traitement et de mesure seraient éventuellement construits en modules industriels miniaturisés.

L'étude préliminaire que nous avons entreprise s'appuie sur le fait qu'il peut être envisagé d'entreposer en un lieu fixe, une grande quantité de solution liquide prête à l'emploi et dont les caractéristiques physiques seraient maintenues constantes. Seule, la quantité nécessaire aux essais envisagés serait transportée dans le système d'éjection transportable, qui serait constitué de récipients unitaires de 4 litres de capacité, puisque le débit moyen, pour un microjet de 0,1 millimètre de diamètre, est de l'ordre de 1 litre/heure.

Système hydraulique d'éjection.



vers Micro - injecteur

Nous avons tout d'abord envisagé la construction d'une pompe constituée d'un soufflet cylindrique en téflon maintenu par deux dispositifs à brides de manière à former un récipient hermétique pouvant être rempli de liquide. Un système mécanique externe aurait exercé sur la bride supérieure un effort constant de façon à conduire le liquide, à débit constant, par un tube souple raccordé à un orifice percé dans la bride inférieure, vers le micro-injecteur.

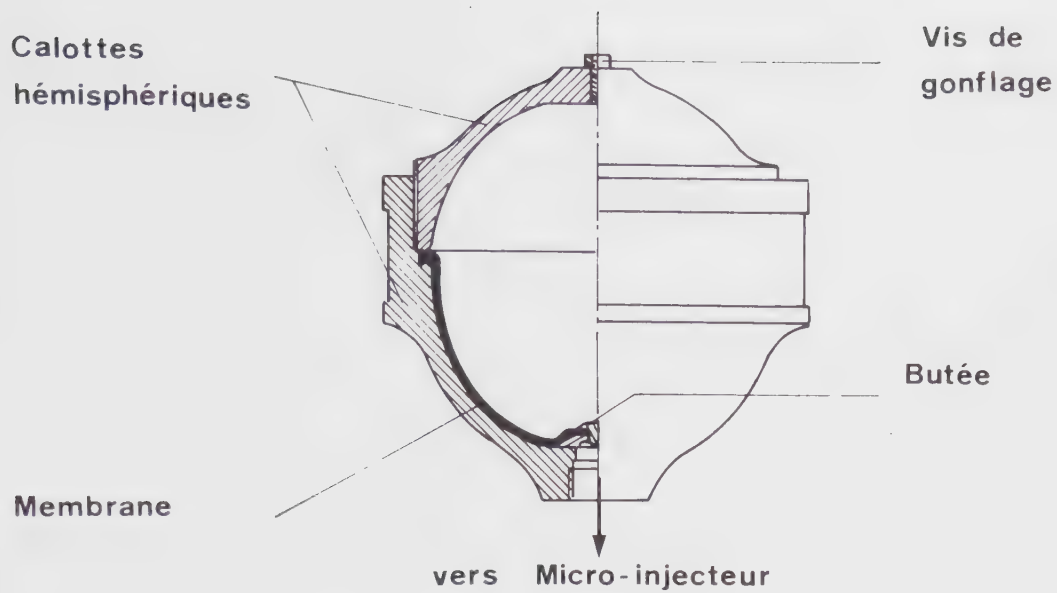
Par suite de difficultés de réalisation pratique, notamment celle d'un soufflet de volume adéquat à parois souples mais supportant une pression de l'ordre de 10 kg/cm^2 , ce principe de dispositif d'éjection a été abandonné au bénéfice d'un montage construit sur le même modèle que le dispositif de laboratoire.

Un accumulateur hydraulique de 4 litres de contenance, équipé de robinets à double direction, serait relié d'une part à une bouteille de gaz neutre comprimé, d'autre part au micro-injecteur par l'intermédiaire d'un tube souple.

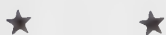
Des essais ont été effectués à une échelle réduite au moyen d'un accumulateur hydraulique à membrane LEDUC de 1 litre de capacité.

Cet accumulateur est constitué de deux calottes hémisphériques vissées l'une dans l'autre et serrant une membrane qui assure la séparation liquide-gaz. Une butée évite toute extrusion de la membrane dans l'orifice d'éjection du fluide.

Ce type d'accumulateur présente divers avantages intéressants : il est relativement léger (un accumulateur de 4 litres ne pèse que 21 kilogrammes), et peut être placé dans une position quelconque ; la pression de gonflage n'est limitée que par la pression d'utilisation maximale, surabondante dans notre application (400 bars) ; il permet une vidange totale ; la membrane peut supporter des variations de température considérables et résiste à un grand nombre de fluides corrosifs ; enfin les parties métalliques peuvent être soit en acier inoxydable soit nickelées et traitées.



Les expérimentations en cours sont satisfaisantes et vont conduire à la réalisation d'un prototype.



ANNEXE II

MISE EN OEUVRE DE L'INSTRUMENTATION

A.1. Préparation de l'essai

La solution liquide de chlorure d'ammonium, homogénéisée, désaérée, est mise en réserve dans l'accumulateur pneumatique.

Les appareils électroniques (fluctuomètre, voltmètre, oscilloscope, imprimante et thermomètre) sont étalonnés au moyen des références internes après avoir été mis sous tension pendant le temps nécessaire à la stabilisation de la température à l'intérieur des coffrets.

L'intensité du courant I produit par le générateur de courant est ajustée à la valeur désirée (280 microampères). Après avoir choisi et réglé la vitesse $\bar{U}$ de l'écoulement à surface libre, on règle la pression dans le compartiment supérieur de l'accumulateur de manière que le microjet ait une vitesse $\bar{u}$ telle que $\bar{u}/\bar{U} = 0,9$.

A.2. Etalonnage

Pour réaliser l'étalonnage, on dispose l'axe du micro-injecteur perpendiculairement à la surface libre moyenne étudiée, dans une section assez proche de l'injecteur principal de manière que les amplitudes des fluctuations soient très petites. Après avoir déterminé l'origine des ordonnées, on règle le comparateur transversal de manière que ses indications correspondent aux longueurs théoriques ℓ du microjet.

On choisit le temps d'intégration τ (cf. IV.2.) que l'on affiche sur le voltmètre.

Par déplacements du micro-injecteur suivant sa direction axiale (axe des ordonnées) on fait varier la longueur du microjet par pas successifs de longueur $\Delta \ell$. Pour chacune des longueurs de microjet on ajuste le seuil de discrimination du fluctuomètre et le gain G_m du voltmètre fonctionnant en "valeur moyenne" et "entrée continue". En chaque point d'étalonnage, on contrôle les valeurs de l'intensité i du courant dans le microjet, de la température T , et on relève les valeurs de la longueur théorique ℓ du microjet et de la résistivité instantanée ρ_i . L'imprimante enregistre une suite de n valeurs de la tension E_m indiquée par le voltmètre, de n valeurs de la fraction τ' du temps d'intégration τ pendant laquelle le signal aux bornes du microjet n'est pas perturbé.

On détermine les valeurs de $\bar{e}$ qui correspondent aux valeurs mesurées E_m relatives à chaque valeur de ℓ par la relation

$$\bar{e} = \frac{1}{\tau} \frac{5}{G_m} \frac{\bar{\rho}}{\rho_i} \bar{E} \quad (1) \quad **$$

dans laquelle $\bar{\rho}$ et $\bar{E}$ sont respectivement les valeurs moyennes de la résistivité ρ_i et de la tension E_m au cours de l'exploration $\left[\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_1^n \rho_i \text{ et } \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_1^n E_m \right]$

A.3. Mesure

Les mesures sont effectuées successivement en plusieurs sections de l'écoulement. Elles consistent à relever simultanément, en chacune de ces sections, la position moyenne de la surface libre et les écarts quadratiques moyens. L'axe du micro-injecteur étant toujours placé dans la section d'étalonnage, on impose au microjet une longueur théorique $\ell = \ell_0$ compatible avec les amplitudes des fluctuations qui correspondent à la vitesse moyenne $\bar{U}$ de l'écoulement et avec l'épaisseur de la couche limite d'air. (cf.II.4.). Le chariot permet ensuite de déplacer le micro-injecteur parallèlement à l'axe longitudinal de l'écoulement.

- Relevé de la position moyenne de la surface libre :
après avoir sélectionné les fonctions utiles du voltmètre ("valeur moyenne", "entrée continue", temps d'intégration) on règle son gain G_m à une valeur com-

** Le coefficient 5 qui apparaît dans les équations (1) et (2) provient du fait que le fluctuomètre a un gain continu fixe de 0,2 , gain de l'étage amplificateur-limiteur (cf.III.3.2).

patible avec l'amplitude du signal qui lui est injecté puis on ajuste le seuil de discrimination du fluctuomètre. Comme lors de l'étalonnage, on contrôle la température et la résistivité et on note E_m . A l'aide de la relation (1) on calcule $\bar{e}$ en donnant toujours à $\bar{\rho}$ la valeur calculée au cours de l'étalonnage. A cette valeur de $\bar{e}$ correspond, par l'intermédiaire de la courbe d'étalonnage, une valeur $\bar{l}$ de la longueur du microjet.

- Ecartes quadratiques moyens :

Les fonctions sélectionnées sur le voltmètre sont : "valeur quadratique", "entrée alternative", temps d'intégration τ ; on règle son gain G_q . On ajuste le seuil de discrimination et le gain alternatif g du fluctuomètre. Tout en contrôlant la température et la résistivité, on note n valeurs de E_q données par le voltmètre. La valeur de e_q , écart quadratique moyen de la tension aux bornes du microjet est déterminée par la relation :

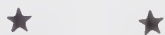
$$e_q = \frac{5}{G_q} \frac{1}{g} \sqrt{\frac{\bar{\rho}}{\rho_i} \frac{\bar{E}_q}{\tau}} \quad (2) \quad **$$

dans laquelle $\bar{E}_q = \frac{1}{n} \sum_1^n E_q$

A cette valeur e_q on fait correspondre une valeur de l'écart quadratique moyen q de la longueur $\bar{l}$ du microjet par

$$q = e_q / S \quad (3)$$

où S est le coefficient de sensibilité du détecteur, égal à la pente moyenne de la droite d'étalonnage .



REFERENCES

- I -

- [1] ALTERMAN, - *"Capillary Instability of a Liquid Jet"*
Phys. of Fluids, Vol.4, n°8, 1961, pp. 955-962

- [2] BANKS, R.B. et CHANDRASEKHARA, D.V. - *"Experimental Investigation of the
penetration of a high velocity gas jet through a liquid surface"*
J. Fluid Mech. , 1963, pp. 13 - 34

- [3] BOUASSE, - *"Jets, Tubes et Canaux"*

- [4] DODU, J. - *"Contribution à l'étude de la dispersion des jets liquides
à grande vitesse"*
P.S.T. Ministère de l'Air, n°407, 1964

- [5] GAVIS, J. - *"Contribution of Surface tension to expansion and contrac-
tion of capillary jets"*
Phys. of Fluids, Vol.7, n°7, 1964, pp. 1097-1098

- [6] GOREN, S.L. et WRONSKI, S. - *"The shape of low speed capillary jets of
Newtonian Liquid"*
J. Fluid Mech. , Vol.25, Part1, 1966, pp. 185-198

- [7] HAENLEIN, A. - *"Über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles"*
Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 2,4, 1931,
pp. 139-149

- [8] HARMON, D.B. - *"Drop Sizes from low Speed Jets"*
J. Franklin Institute, 259, 1955, pp. 519-522

- [9] HERAUD, D. - *"Dispersion des Jets Liquides ; influence des rugosités
de paroi"*
Thèse, 1966, Grenoble

- [10] LUNDY, C.C. - *"Making accurate Small holes"*
Rev. Sci. Instrum. , 1962, pp. 197-198

- [11] MIDDLEMAN, S. et GAVIS, J. - *"Expansion and Contraction of capillary jets
of Newtonian liquids"*
Phys. of Fluids, Vol.4, n°3, 1961, pp. 355-359

- [12] MIDDLEMAN, S. et GAVIS, J. - *"Expansion and Contraction of capillary jets
of viscoelastic liquids"*
Phys. of Fluids, Vol.4, n°8, 1961, pp. 963-969

- [13] RAYMOND, M. et SIMONIN, R.F.- *"Recherches théoriques et expérimentales sur
l'entraînement d'air par une veine cylindrique percutant dans
une masse d'eau."*
A.I.R.H. , 8ème Congrès, Montréal, Août 1959

- [14] SHINOZUKA, S. - *"Special method for boring very fine round holes"*
Rev. Sci. Instrum. , 27, n°7, 1956, pp. 542-543

- [15] WEBER, C. - *"Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles"*
Ztschr. f. Angew. Math. und Mech. , 11, 2, 1931, pp. 136-155

- [16] CHEN, T.F. et DAVIS, J.R. - *"Measuring Water Surface Disturbances"*
Agricultural Engineering, Avril 1961, pp. 192-195
- [17] DEBEAUVAIS, F. - *"Contribution à l'étude de la désagrégation des jets liquides dans l'air en mouvement"*
P.S.T. Ministère de l'Air, n°406, 1964
- [18] DIAMANT, S.W. - *"Etude photomicrographique de la pulvérisation de combustibles au sein d'une chambre de combustion"*
Thèse, 1960, Paris
- [19] DODU, J. et HUSSENOT-DESENONGES, C. - *"Dispositif de mesure des fluctuations géométriques de surface libre"*
C.R.Ac.Sci. , 269, 1969, pp. 805-808
- [20] FIETZ, T.R. - *"A simple mean conductivity meter"*
J.Sci.Instrum. , Vol.42, 1965, pp. 163-164
- [21] HERAUD, D. et HUSSENOT, C. - *"Mesures statistiques de fluctuations de surface libre"*
C.R.Ac.Sci. , 1964, pp. 719-721
- [22] HUSSENOT-DESENONGES, C. et BAUDOIN, J. - *"Mesure de la valeur quadratique d'un signal aléatoire"*
Electronique Industrielle, n°99, 1966, pp. 803-807 (1e Partie)
et n°100, 1967, pp. 79-87 (2e Partie)

- [23] KAISER, W. - *"Oscillomink, oscillographe à jet liquide pour enregistrement direct"*
Rev. SIEMENS, n°6, Octobre 1959, pp. 200-202
- [24] MUENZ, K. et MARCHELLO, J.M. - *"Technique for Measuring Amplitude of Small Surface Waves"*
Rev. Sci. Instrum. , Vol.35, n°8, 1964, pp. 953-957
- [25] NIKIFORUK, P.N. - *"A technique for non linear function generation"*
Electr.Engng. , March. 1955, pp. 118-119
- [26] SAUBER, J.W. - *"Square low detector"*
Electronics, November 1955, pp. 170-172
- [27] SOULE, C. - *"Récents perfectionnements dans la mesure des impédances"*
Mesures, Juillet 1959.

